



Universitat
de les Illes Balears

TREBALL DE FI DE GRAU

ESTUDI NUMÈRIC DE L'EMBAT (BRISA MARINA) A LA CONCA D'ALCÚDIA (MALLORCA)

Laura Marí Cabanes

Grau de Física

Facultat de Ciències

Any Acadèmic 2022-23

ESTUDI NUMÈRIC DE L'EMBAT (BRISA MARINA) A LA CONCA D'ALCÚDIA (MALLORCA)

Laura Marí Cabanes

Treball de Fi de Grau

Facultat de Ciències

Universitat de les Illes Balears

Any Acadèmic 2022-23

Paraules claus del treball:

Balanç d'energia superficial, brisa marina, simulació mesoescalar, terral, validació

Nom de la Tutora del Treball: Maria Antònia Jiménez Cortés

Autoritz la Universitat a incloure aquest treball en el repositori institucional per consultar-lo en accés obert i difondre'l en línia, amb finalitats exclusivament acadèmiques i d'investigació.

Autor	Tutor
Si No	Si No
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

Resum

Aquest treball es centra en l'estudi dels mecanismes físics que s'observen durant l'inici i propagació de la brisa marina. És un règim de vent freqüent a les zones costaneres durant els mesos càlids de l'any. S'ha fet servir principalment una simulació obtinguda del model numèric Meso-NH sobre el domini de la conca d'Alcúdia. Per recolzar els resultats obtinguts i demostrar el bon funcionament de la simulació, s'han utilitzat també dades observacionals. Aquestes han estat obtingudes a partir d'una xarxa d'estacions meteorològiques superficials ubicades a diferents punts de la conca.

D'aquesta manera, s'han descrit les característiques i l'evolució de la brisa marina a partir de sèries temporals de magnituds meteorològiques, així com talls horitzontals i transversals a moments clau de la circulació. S'ha comprovat que la brisa actua com a una advecció freda i humida i que la seva intensitat depèn del vent general. Finalment, s'ha mostrat com l'arribada de la brisa condiciona el balanç d'energia superficial.

Resumen

Este trabajo se centra en el estudio de los mecanismos físicos que se observan durante el inicio y la propagación de la brisa marina. Es un régimen de viento frecuente en las zonas costeras durante los meses cálidos del año. Se ha utilizado principalmente una simulación obtenida del modelo numérico Meso-NH sobre el dominio de la cuenca de Alcúdia. Para respaldar los resultados obtenidos y demostrar el buen funcionamiento de la simulación, también se han utilizado datos observacionales. Estos datos se han obtenido a partir de una red de estaciones meteorológicas superficiales ubicadas en diferentes puntos de la cuenca.

De esta manera, se han descrito las características y la evolución de la brisa marina a partir de series temporales de magnitudes meteorológicas, así como cortes horizontales y transversales en momentos clave de la circulación. Se ha comprobado que la brisa actúa como una advección fría y húmeda, y que su intensidad depende del viento general. Finalmente, se ha mostrado cómo la llegada de la brisa condiciona el balance de energía superficial.

Abstract

This work focuses on the study of the physical mechanisms observed during the onset and propagation of the sea breeze. It is a common wind regime in coastal areas during the warm months of the year. We have primarily used a simulation obtained from the Meso-NH numerical model over the Alcúdia basin. To support the obtained results and demonstrate the proper functioning of the simulation, observational data have also been taken. These data were obtained from a network of surface meteorological stations located at various points within the basin.

The characteristics and evolution of the sea breeze have been described based on time series of meteorological magnitudes, as well as horizontal and transverse cross-sections at key moments of circulation. It has been confirmed that the sea breeze acts as a cold and humid advection, and its intensity depends on the general wind. Finally, it has been shown how the arrival of the sea breeze conditions the surface energy balance.

Índex

1	Introducció teòrica	2
1.1	La brisa marina (o embat) a Mallorca	4
1.2	Els termes del balanç d'energia superficial	5
2	Metodologia	6
2.1	Descripció de la simulació numèrica realitzada	6
2.2	Validació de la simulació mitjançant observacions	8
2.3	Diagnòstics per determinar la propagació del front de brisa	10
3	Resultats	11
3.1	Verificació de la simulació amb dades superficials	12
3.1.1	Validació del front de brisa a la zona costanera (Sa Pobla)	12
3.1.2	Validació del front de brisa a zones en terreny complex (Pontons i Lloseta)	14
3.1.3	Validació emprant el conjunt d'observacions disponibles	15
3.2	Estructura horitzontal del front de brisa	16
3.2.1	El front de brisa a l'estat estacionari	16
3.2.2	Descripció del cicle diürn	19
3.3	Estructura vertical del front de brisa	21
3.3.1	El front de brisa a l'estat estacionari	21
3.3.2	Descripció del cicle diürn del front de brisa	23
3.4	Diagnòstics per l'anàlisi de la propagació del front brisa a la conca d'Alcúdia.	25
4	Conclusions	29
A	Vectors de vent a diferents altures	31

1 Introducció teòrica

La brisa marina (més coneguda a Mallorca com "embat") és una circulació local que es produeix en zones costaneres durant les hores centrals del dia dels mesos més càlids de l'any en condicions de vent general feble (com per exemple situacions anticiclòniques) [1]. Es pot observar des dels pols fins a l'equador, la qual cosa mostra la seva independència amb la latitud.

Durant el dia, l'aire sobre la terra s'escalfa (i s'expandeix) més ràpidament que l'aire sobre l'aigua a causa de la major capacitat calorífica de l'aigua. Això provoca una diferència de temperatures entre el terra (Land Surface Temperature, LST, en Anglès) i la mar (Sea Surface Temperature, SST). Aleshores, es produeix un gradient tèrmic horitzontal $\Delta T = LST - SST$, responsable del gradient de pressió superficial terra-mar (veure esquema de la Fig.1). Com a resposta, a la costa bufa aire fresc i humit del mar cap a l'interior (brisa marina). Es desenvolupa una circulació de manera que l'aire marí flueix cap a la terra a nivells baixos i terra endins es produeixen ascensos i torna al mar a nivells més alts. El retorn és difícil d'observar ja que sovint queda eclipsat per les condicions sinòptiques (vent general)[2].

Aquest règim de brisa marina finalitza durant la tarda, quan la radiació solar disminueix i el gradient tèrmic s'inverteix. Aleshores durant la nit es genera el terral, un vent dirigit de terra cap a mar, totalment oposat a la brisa.

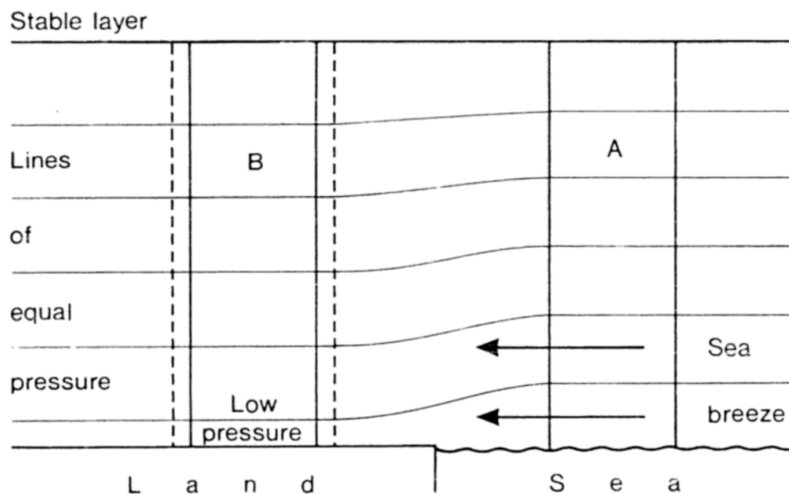


Figura 1: Diagrama que representa el gradient de pressions que es forma entre la terra i el mar durant l'embat. Les fletxes indiquen la direcció del vent de brisa que es generaria en aquestes condicions. Font: [1]

La brisa marina és un règim de vent que té clarament un cicle diürn [3]. Comença unes hores

després de la sortida del Sol i s'intensifica durant el matí a mesura que augmenta la diferència de temperatura (ΔT). El front de brisa produït a la costa es propaga cap a l'interior degut al ΔT generat i moltes vegades influenciat pels vents de pendent que es formen a les muntanyes més interiors. El pas del front de brisa provoca una disminució de la temperatura i un augment de la humitat que pot penetrar uns 10-30 km i arribar a altituds de fins a 500 m en condicions meteorològiques favorables.

Hi ha diferents factors que afecten la brisa marina:

1. La intensitat del gradient horitzontal (ΔT) i del vertical (condiciona els ascensos d'aire a l'interior) [4].
2. Les característiques superficials (per exemple, la humitat del sòl o la vegetació poden condicionar la propagació del front de brisa) [5].
3. La topografia de la costa (els pendents de les muntanyes properes a la costa poden intensificar la propagació del front de brisa perquè durant el dia en aquests llocs també es formen vents anabàtics, pendent amunt) [3].
4. La forma de la línia de costa (pot canviar la direcció i intensitat de la brisa marina segons les condicions locals).
5. El vent sinòptic condiciona el cicle diürn de la brisa [4]: intensificant-lo, canviant les hores d'inici i decaïment o disminuint-lo.

Durant la nit, s'observa un procés invers: la terra es refreda més ràpidament que l'aigua, la qual cosa provoca una pressió més alta en comparació amb la de l'aigua. La circulació s'inverteix respecte a l'esquema que es mostra a la Fig.1 i el vent bufa cap al mar. Això es coneix com a brisa terrestre (terral)[6]. La brisa terrestre té una magnitud menor que l'embat degut a que, en aquest cas, l'aigua no guanya calor sinó que reté l'absorbit durant el dia, per la qual cosa les diferències de temperatura i pressió són menors. Pot penetrar 10 km mar endins i està limitada a l'àrea propera a la costa. No obstant això, aquest treball se centra en l'estudi de l'embat, únicament mencionant aquest procés invers.

La brisa marina representa un vehicle, a nivell de mesoescala, a través del qual l'aire marí penetra en les valls interiors durant els mesos més càlids de l'any. El seu estudi i comprensió són d'alta rellevància, ja que una gran part de la població viu en àrees costaneres. Pot proporcionar alleujament de la calor, humitat a partir de la qual hi pot haver formació de boires i influir en la qualitat de l'aire a prop de la superfície terrestre. A més, pot ser una font d'energia eòlica i un vent molt interessant pels esports nàutics.

L'objectiu del treball és la realització d'una simulació atmosfèrica a alta resolució espacial cen-

trada a la conca d'Alcúdia. D'aquesta forma, es podran analitzar les seves sortides i descriure com es comporta el fenomen de brisa en aquesta conca, així com els mecanismes físics que hi intervenen.

1.1 La brisa marina (o embat) a Mallorca

Mallorca és la principal illa de l'arxipèlag de les Balears, situat la conca oest del Mediterrani, entre els 39 i 40° N de latitud i entre els 2.3 i 3.5° E de longitud. Es tracta d'una illa petita (3619 km²), però que degut a la predominança de situacions de feble gradient de pressió durant els mesos d'estiu fa que la brisa marina sigui un règim molt freqüent. Estudis previs mostren que la brisa marina és present a l'illa al voltant del 70-80 % dels dies d'estiu [4].

Per poder entendre millor els processos de brisa a l'illa és necessari descriure la seva topografia. L'illa compta amb dues serralades: la de Tramuntana, a la zona nord-oest amb altitud mitja de 800 m sobre el nivell de la mar, i la de Llevant, a l'est i amb pics que arriben fins als 500 m. Existeixen tres principals conques: les de Palma i Campos al SO i la d'Alcúdia al NE (objecte d'estudi del treball). D'aquesta forma queda una àrea central elevada, anomenada 'el Pla' que connecta les conques de Palma, Alcúdia i Campos a través d'un relleu complex.

Tot i que en condicions de brisa l'embat és present a totes les zones costaneres de l'illa [7], aquest es manifesta de manera més clara a les 3 grans conques (veure Fig.2a). A les zones costaneres de les serres de Tramuntana i Llevant la brisa interacciona fortament amb els vents de pendent i de vall que es generen. Per aquest motiu, l'estudi de la propagació del front de brisa en centra en les 3 grans conques. Degut a la insularitat i a la distribució de les conques existeix una línia de convergència dels fluxos de les tres brises coexistents (en direccions diferents) al centre de l'illa [2, 5, 7]. A les hores de màxim desenvolupament de la brisa, la intensitat del vent pot arribar fins als 5-8 m/s [3].

L'esquema que es mostra a la Fig.2a [7] es va construir a partir d'observacions superficials, però anys més tard han estat confirmats per models numèrics [2, 3, 5].

A la Fig.2b es veu clarament com al centre de l'illa hi ha ascensos deguts a la convergència de vent de brisa de les 3 grans conques. Els resultats de [3] mostren les 5 fases que presenta el cicle de brisa: la fase prèvia (0430-0730 UTC), amb presència de terral; la fase preparatòria (0730-0900 UTC), amb fi del terral i inici de l'embat a la línia de costa; la fase de desenvolupament (0900-1200 UTC), on l'embat arriba fins a velocitats del front mitjanes de 3 m/s i és el període de major turbulència; la fase de maduresa (1200-1500 UTC), on l'embat i ΔT que el provoca són costants i; la fase de decaïment (1500UTC-1900UTC), on la brisa s'atenua perquè ΔT disminueix.

La confirmació de l'existència d'aquestes fases de brisa, així com la seva descripció a la conca d'Alcúdia es realitzarà a l'apartat de resultats a partir de dades observacionals de l'estació de Sa Pobla, localitzada a la plana.

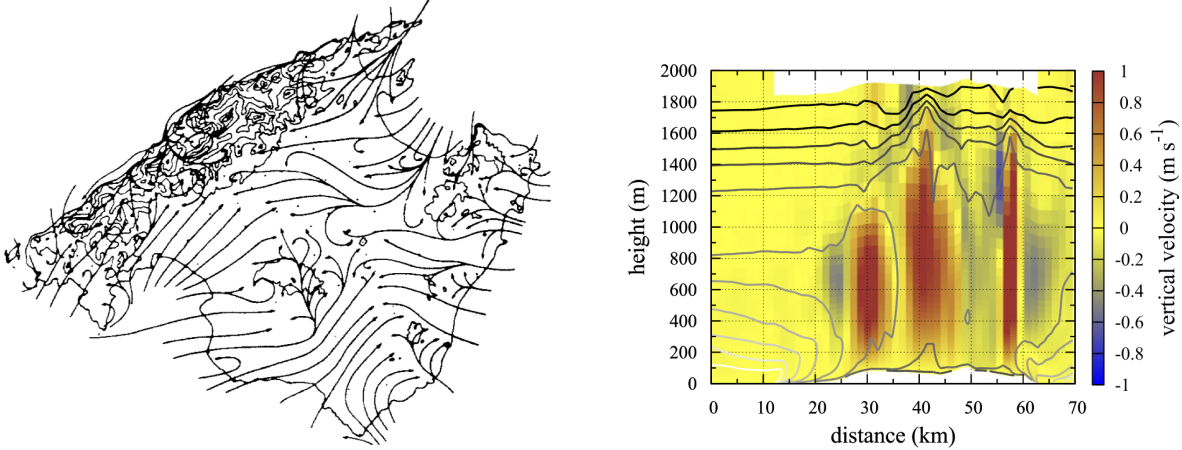


Figura 2: (a) Línies de corrent de la brisa marina desenvolupada a l'illa de Mallorca segons els estudis de [5]. (b) Tall vertical (de la badia de Palma a la d'Alcúdia) de la velocitat del vent vertical en condicions de brisa obtingut a partir d'una simulació mesoescalar [3].

La conca de Palma ha estat estudiada amb dades (hi ha moltes observacions)[4] i la de Campos, amb dades i simulació. Per altra banda, a la d'Alcúdia no hi ha gaire dades i, a més, mai s'ha estudiat amb simulació com les d'abans [8].

1.2 Els termes del balanç d'energia superficial

Per tal d'estudiar els mecanismes físics que intervenen durant la propagació del front de brisa cap a l'interior, s'analitzaran com varien els intercanvis d'energia sòl-atmosfera en condicions de brisa. Per això, s'empra la següent definició per l'equació de balanç d'energia superficial (veure detalls a [9]):

$$R_n + LE + H + G = 0 \quad (1)$$

on R_n correspon a la radiació neta, que es tracta del principal input d'energia durant el dia. Aquesta condueix als LE i H , els fluxos de calor turbulent latent i sensible, i a G , el flux de calor del sòl. El criteri de signes utilitzat per tots els fluxos és que aquells que es dirigeixen cap a la superfície són positius i els que surten de la superfície, negatius.

Es tracta d'una equació molt simplificada que no té en compte altres processos que poden afectar i modificar l'energia superficial. Aquesta simplificació condueix a l'aparició d'un residu (imbalace en Anglès) que pot tenir gran pes en el balanç. Un estudi realitzat al campus de la UIB (a la conca de Palma), mostra com el residu pot representar fins a un 30 % de la radiació neta, R_n [10]. No obstant, no s'entra en detall respecte d'aquest residu, ja que als models numèrics es considera zero

degut a que no hi ha una parametrització estàndard per tenir-ho en compte.

En aquest treball s'estudia com la brisa marina pot impactar a cada un dels termes de l'Eq.1 per incrementar el coneixement de la interacció atmosfera-sòl.

2 Metodologia

2.1 Descripció de la simulació numèrica realitzada

La descripció que es donarà de la brisa marina de la conca d'Alcúdia en aquest treball està basat en els resultats numèrics obtinguts pel model Meso-NH [11]. Es tracta d'un model mesoescalar que es corre en condicions de contorn d'un model global (en particular l'anàlisi del European Center for Medium-Range Weather forecasts, ECMWF).

La simulació de 36 hores que s'ha emprat va ser iniciada a les 1200 UTC del dia 20 de juliol de 2021. La duració de la simulació implica la possibilitat de poder descriure la circulació d'embat d'un dia complet, el 21 de juliol. Per tant, ens centrarem únicament en les 24 hores UTC del dia 21 de juliol de 2021, evitant així analitzar l'spin up de la simulació (mentre els camps s'estabilitzen).

En referència a l'elecció específica del dia simulat, aquest s'ha triat perquè es tracta d'un cas de dia d'estiu i amb vent general feble que, com s'ha comentat anteriorment, són les condicions meteorològiques òptimes per la formació de brisa. Un detall que facilitarà el posterior anàlisi dels resultats és que el vent general del dia escollit és en direcció sud-oest, contrari al de l'embat a la conca d'Alcúdia, de direcció nord-est.

La simulació té 3 dominis amb diferents resolucions horitzontals (veure Fig.3 i 4). El domini 1 (arxipèlag Balear, Fig.3a), té una resolució de 5 km x 5 km; el domini 2 (Mallorca, Fig.3b), de 1 km x 1 km; i, finalment, el domini 3 (conca d'Alcúdia, Fig.4), de 250 x 250 m. Pel que fa a la vertical, la resolució és de 3 m prop del sòl i es degrada a nivells més alts (a 1 km d'altitud la resolució és de 100 m). En el cas del cim del domini (≈ 10 km) la resolució és al voltant dels 500 m. Això és per capturar amb més detall els processos de capa baixa.

Observant cada domini representat segons la resolució del model, podem explicar com afectaria l'elecció d'un dels dominis i justificar perquè escollim el domini 3 per l'estudi de la brisa. Al domini 1 (Fig.3a), al ser tan baixa la resolució, no seria possible l'observació de les entrades de brisa a cada conca i, molt menys, el seu estudi. Al domini 2 (Fig.3b), on ja es pot apreciar millor la topografia, és a dir, els sistemes muntanyosos i les conques, al sistema sí es reproduiria correctament l'entrada de la brisa. No obstant, és en el domini 3 (Fig.4) on la topografia tan suau que presenta el domini 2, adquireix detall, necessari per descriure el fenomen de brisa a la conca d'Alcúdia. És per aquest motiu que en aquest treball ens centrarem en analitzar el domini 3, el de més alta resolució.

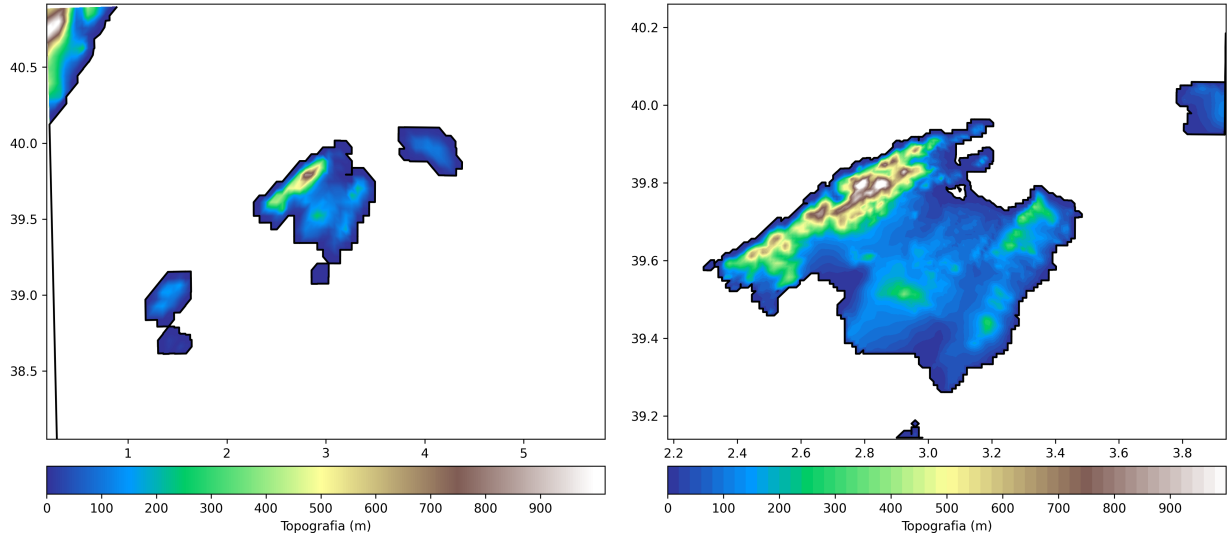


Figura 3: Mapa topogràfic dels dominis 1 i 2 de la simulació respectivament, que corresponen a les Illes Balears i l'illa de Mallorca.

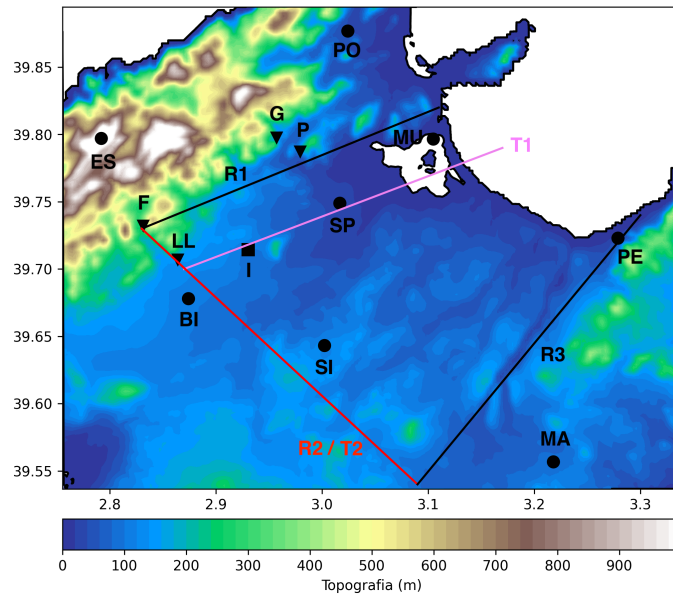


Figura 4: Mapa topogràfic del domini 3 de la simulació, corresponent a la conca d'Alcúdia.

Aquesta simulació és computacionalment molt cara. Per exemple, per la condició CFL els passos de temps són de l'ordre d'1 s. La simulació s'ha corregut al supercomputador del European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) on s'han emprat 6 nodes amb 256 CPUs cada un

d'ells. Cal destacar que aquest treball no ha consistit en l'execució de la simulació, sinó en l'anàlisi posterior d'aquesta.

La simulació proporciona dades numèriques en 3 dimensions i, per tant, permet estudiar els règims verticals i horitzontals de l'embat. Amb aquest objectiu, s'han extret diferents camps: sèries temporals, talls horitzontals i talls verticals cada 30 minuts. L'estudi dels talls està centrat a les 1300 UTC, moment del dia de major desenvolupament i intensitat de la brisa. També es mostren els camps a les 0200, 0900 i 1800 UTC corresponents a presència de terral (durant la nit) i a instants abans i després de la formació del front de brisa, respectivament.

Per les sèries temporals s'han obtingut dades (per cada punt del domini) de les següents magnituds meteorològiques: temperatura, humitat específica, intensitat i direcció del vent i cada un dels termes de l'equació de balanç energètic superficial. Pels resultats de les sèries s'ha de tenir en compte que el vent és a una altitud de 10 m, mentre que la resta de variables a 1.5 m (excepte el balanç superficial).

Els talls horitzontals s'han extret per els dominis 2 i 3, mentre que els verticals únicament dins en domini 3. Els dos talls verticals analitzats al treball apareixen com a dues rectes de color rosa i vermell (T1 i T2) a la Fig.4. El T1 és per estudiar com es propaga el front de brisa a la conca d'Alcúdia, mentre que el T2 és per avaluar què passa a l'interior de l'illa.

La informació obtinguda de la simulació ha estat processada de forma diferent segons el camp. Totes figures de camps horitzontals s'han extret directament de la simulació a partir de les eines gràfiques del model. El diaprogram és el paquet gràfic que té el model per pintar i extreure camps de les sortides que es generen (en format binari). Mitjançant unes instruccions es poden pintar gràfics com els que es mostren a la secció 3.2. Per altra banda, s'han convertit algunes sortides a netcdf per poder-les analitzar amb Python. A més, s'han convertit alguns camps a ASCII per poder calcular diagnòstics addicionals, també amb Python.

2.2 Validació de la simulació mitjançant observacions

Per tal de validar els resultats numèrics, s'han emprat totes les dades observacionals disponibles a la conca d'Alcúdia. Aquestes són bàsicament mesures superficials que provenen de diferents fonts.

En el mapa de la Fig.4 apareixen les estacions meteorològiques de les quals s'han pogut obtenir dades observacionals de diferents variables atmosfèriques (temperatura, humitat i intensitat i direcció del vent, entre d'altres). Aquestes estacions pertanyen a distintes institucions. Les que apareixen en forma de cercle, corresponen a estacions de l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET). L'estació d'Inca, en forma de quadrat, es troba a l'estació depuradora d'aigües residuals (EDAR). Finalment, hi ha les estacions en forma de triangle, instal·lades i mantingudes pel grup de meteorologia de la UIB (anomenades AGRO per diferenciar-les de les altres dues). Totes elles es

troben llistades a la Taula 1.

	Estació		Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)
AGRO	G	Gabellí	39.7975	2.9570	104
	P	Pontons	39.7871	2.9792	35
	F	Filicumis	39.7319	2.8313	183
	LL	Lloseta	39.7068	2.8640	130
AEMET	BI	Binissalem	39.6781	2.8739	105
	PE	Colònia de Sant Pere	39.7230	3.2786	99
	ES	Escorca	39.7972	2.7919	850
	MA	Manacor	39.5569	3.2178	95
	MU	Muro	39.7967	3.1047	2
	PO	Pollença	39.8769	3.0242	35
	SI	Sineu	39.6433	3.0022	120
SP	Sa Pobla	39.7491	3.0166	40	
EDAR	I	Inca	39.7144	2.9305	87

Taula 1: Estacions meteorològiques de les quals es tenen observacions, juntament amb la seva posició (latitud i longitud) i altitud (metres sobre el nivell de la mar). També s'indiquen les abreviacions amb les que apareixen a la Fig.4.

A diferència de les dades obtingudes amb la simulació, que són cada 30 minuts, les dades observacionals són cada 10 minuts per totes les estacions. A més, mentre que les dades de mòdul i direcció de vent són a 10 m d'altitud per les estacions AEMET/EDAR, no és així per la resta de magnituds (mesurades a 1.5 m). Pel que fa a AGRO, les mesures de vent són a 3 m i la resta a 2.4 m aproximadament.

Per poder tenir totes les dades en els mateixes unitats s'han hagut de fer conversions per les dades numèriques. La humitat obtinguda a partir de la simulació és humitat relativa. Per convertir la humitat relativa (HR) observada a humitat específica (q) s'han utilitzat les següents expressions per pressió (p), pressió de saturació de vapor (e_s), relació de mescla (r_s) i humitat específica (q) en aquest ordre:

$$p = p_0 - \rho gh \quad (2)$$

$$e_s = 6.112 \cdot e^{\left(\frac{17.67T}{T+243.5}\right)} \quad (3)$$

$$r_s = 0.622 \frac{e_s}{p - e_s} \quad (4)$$

$$q = HR \cdot r_s \cdot 0.01 \quad (5)$$

on $p_0 = 10^5$ Pa, $\rho = 1.3 \text{ kg/m}^3$ és la densitat de l'aire, h és l'altitud sobre el nivell de la mar, T és la temperatura potencial en Kelvin (K) i HR és la humitat relativa.

Per altra banda, s'ha convertit la temperatura potencial obtinguda pel model $\theta(K)$ a temperatura, $T(^{\circ}\text{C})$. La fórmula utilitzada és:

$$T = \theta \left(\frac{p_0}{p} \right)^{-\frac{R}{C_p}}; \quad \frac{R}{C_p} = 0.286 \quad (6)$$

on R és la constant de gasos de l'atmosfera i C_p és el calor específic a pressió constant.

A part de fer una comparació gràfica de sèries temporals entre les dades numèriques i les observacions, es calcularan els BIAS per les estacions més rellevants per l'estudi. El BIAS permet quantificar i avaluar la precisió dels resultats simulats respecte de les variables observades (temperatura, humitat, intensitat i direcció del vent). Es pot calcular a partir de la següent equació:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - o_i) \quad (7)$$

on N és el nombre total de dades, m_i són les dades del model i o_i les dades de les observacions. Si en lloc de considerar 1 estació es consideren un conjunt, es pot calcular també el mean BIAS. Valors de BIAS propers a 0 indiquen que el model reproduïx resultats realistes.

2.3 Diagnòstics per determinar la propagació del front de brisa

Amb l'objectiu de realitzar un anàlisi més profund dels resultats numèrics obtinguts, s'han filtrat tots els punts del domini 3 de la zona plana de la conca d'Alcúdia.

La zona d'interès és la que es troba delimitada a la Fig.4 per les tres rectes (R1, R2 i R3). Es centra en la zona més plana de la conca d'Alcúdia, deixant de banda el terreny corresponent a les serres de Tramuntana i Llevant i aquell influenciat per la brisa que arriba de la conca de Palma. És per aquest motiu que pot observar que a la figura només es mostra la topografia fins als 1000 metres d'altitud, ja que no serà necessari el coneixement precís del relleu muntanyós.

Per començar, s'han descartat tots els punts que es trobaven fora de les tres rectes de la Fig.4, les quals actuen com a contorn de la zona d'interès del domini. A partir de les coordenades dels punts inicial i final de cada recta, s'han determinat les equacions de recta per cada una. Els resultats obtinguts són: $lat = 0.3214 \cdot lon + 38.82$, per la recta 1, $lat = -0.7308 \cdot lon + 41.7961$ per la recta 2 (que coincideix amb un dels talls verticals) i $lat = 0.9524 \cdot lon + 36.60$ per la recta 3. Per utilitzar

únicament els punts situats a la zona del domini delimitada per les tres rectes, descartam els punts que tenen una latitud per damunt de la recta 1 i per davall de les rectes 2 i 3.

Finalment, s'han exclòs també els punts que es trobessin a una altitud superior als 150 m. El pas de 32000 a 8416 punts en la horitzontal per cada hora mostra la magnitud del filtratge que hem fet a les dades numèriques. D'aquesta manera, és possible estudiar el fenomen de la brisa marina a la zona plana de la conca d'Alcúdia, així com la seva evolució. Aquest procés s'ha realitzat per cada hora del dia d'estudi (21/07/21).

Els punts resultants han estat classificats segons la seva direcció (emprant el vent a 10 m del model) i s'ha calculat el percentatge de punts que hi ha de cada una de les 4 direccions de vent per cada hora. Les quatre direccions les hem definit de forma que: de 0° a 45° i de 315° a 360° és vent de nord; de 45° a 135° , vent d'est; 135° a 225° , vent de sud; i, de 225° a 315° , vent d'oest. Els rangs de direcció de vent s'han elegit de forma que es puguin captar bé tots els punts de nord-est com a brisa i de sud-oest com a terral durant el dia i la nit, respectivament.

Per cada una de les direccions, s'ha fet una mitjana condicionada en aquella hora per cada una de les variables meteorològiques i dels termes del balanç d'energia amb superfície del model. D'aquesta manera s'han realitzat sèries temporals específiques de cada vent. Les mitjanes condicionades s'han calculat amb la següent expressió general:

$$MEAN = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad (8)$$

on N són el nombre total de dades i n_i cada una de les dades de la magnitud meteorològica.

No obstant, les dades numèriques que obtenim del vent són les seves components zonal (horitzontal) i meridional (vertical), u i v . Per tant, s'ha calculat per cada cas el mòdul i direcció de vent a partir de les següents fórmules:

$$|u| = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (9)$$

$$dir = \left| \arctan\left(\frac{v}{u}\right) + 180 \right| \quad (10)$$

A l'Eq.10 s'ha considerat la convenció meteorològica per les direccions de vent: la direcció és aquella de la que arriba el vent, no cap a la que es dirigeix i que 0° és vent de nord.

3 Resultats

En aquest apartat es presenten i analitzen tots els resultats obtinguts a partir dels diferents camps utilitzats del model numèric: sèries temporals, talls horitzontals i talls verticals.

3.1 Verificació de la simulació amb dades superficials

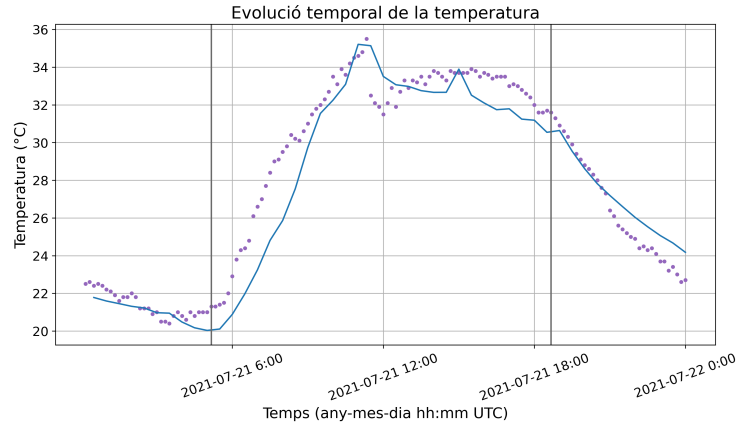
Per validar les sortides del model, de forma que es pugui justificar la seva utilització per descriure el fenomen de l'embat a la conca d'Alcúdia durant la resta del treball, es comparen els resultats numèrics amb les observacions de totes les estacions meteorològiques de la Fig.4.

Amb aquest objectiu, s'estudien i analitzen les sèries temporals del dia d'estudi per 2 casos representatius i rellevants: una estació que es troba a la plana de la conca (Sa Pobla) i dues estacions que es troben en una situació similar (Lloseta i Pontons), influenciades per la topografia complexa que envolta la conca d'Alcúdia. Per tant, les sèries temporals en aquests dos tipus d'estacions permeten avaluar com evoluciona la brisa al model en aquestes dues zones de terreny complex dins la conca.

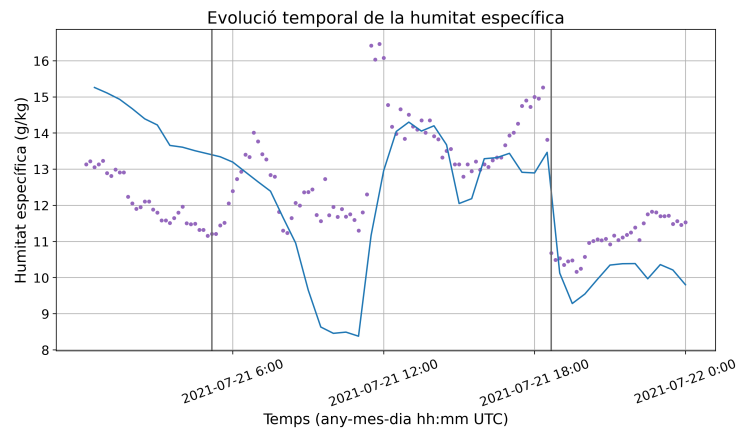
3.1.1 Validació del front de brisa a la zona costanera (Sa Pobla)

Les dades d'aquesta estació, degut a la seva ubicació a la plana de la conca d'Alcúdia i molt prop de la costa, permeten descriure el fenomen d'embat. També ens permet justificar la utilització del model, gràcies als bons resultats que s'obtenen en referència amb les observacions.

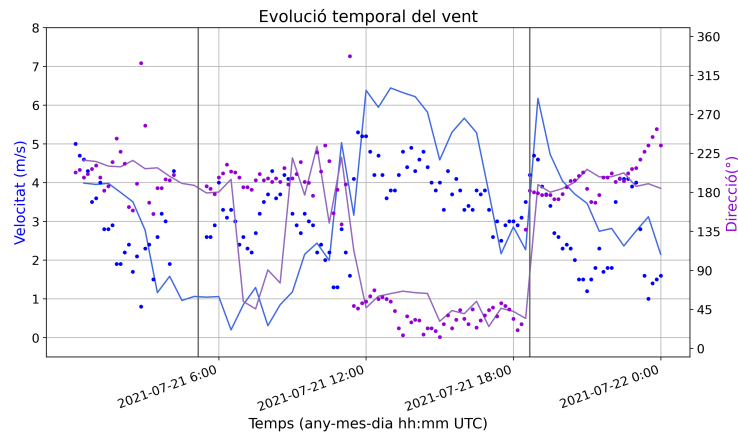
Les magnituds meteorològiques experimentals presentades a la Fig.5 possibiliten diferenciar les cinc fases de la circulació de brisa marina (seguint la descripció del [3]). Entre les 0430-0730 UTC, que correspondria a la fase prèvia (amb $\Delta T < 0$), hi ha un augment moderat de les temperatures i la presència de terral, amb direcció de sud-oest (al voltant dels 180°) de poca intensitat (entre els 2 i 3 m/s). A la fase preparatòria (amb $\Delta T > 0$), entre les 0730 i 0900 UTC, desapareix el terral i comença l'embat a la línia de costa. Com l'estació de Sa Pobla es troba una mica més a l'interior, encara no ha arribat l'efecte de brisa. El vent que s'observa a la Fig.5, que segueix tenint direcció sud-oest es tracta del vent sinòptic d'aquest dia de brisa. A la fase de desenvolupament (amb $\Delta T \gg 0$), entre les 0900 i 1200 UTC, amb l'augment progressiu de la temperatura, la brisa es dirigeix cap a l'interior. Aquest fet es manifestant en aquest cas en una augment de la velocitat fins als 4-5 m/s i un gir en la direcció del vent que passa a ser de nord-est (entre els 0 i 45°). La fase de maduresa (entre les 1200 i 1500 UTC) es caracteritza per tenir $\Delta T = const$ (es veu reflectit a la Fig.5a quan la temperatura deixa d'escalfar) i la brisa continua bufant. Finalment, a la fase de decaïment (entre les 1500 i 1900 UTC) la temperatura i intensitat del vent disminueixen. D'aquesta forma, es debilita la diferència de temperatura entre l'aire del terra i de la mar fins que ΔT canvia de signe. Es pot observar com desapareix l'embat degut al canvi de direcció, tornant al vent de sud-oest sinòptic.



(a)



(b)



(c)

Figura 5: Sèries temporals de les observacions (punts) i de la simulació de (a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (b) Humitat específica (g/kg) (c) Velocitat (m/s) i direcció del vent (graus). Corresponen a l'estació de Sa Pobra (AEMET) per les 24 hores del dia 21 de juliol de 2021.

En quant a la humitat, s'observa un augment considerable, dels 12 als 14 g/kg, que es manté durant tota la fase de maduresa i disminueix bruscament al la posta del sol a les 1800 UTC. La humitat al model baixa molt abans d'arribar la brisa perquè és possible que no vegi bé la zona humida de l'Albufera ni incorpori el regadiu de la zona. Això és una limitació als models, ja que aquestes font d'humitat no estan incloses.

En general, veim com els resultats del model s'ajusten correctament amb les dades observades i és capaç de reproduir el cicle diürn de brisa. Per tant, queda justificada la validesa de la simulació numèrica utilitzada per analitzar la brisa a la conca.

3.1.2 Validació del front de brisa a zones en terreny complex (Pontons i Lloseta)

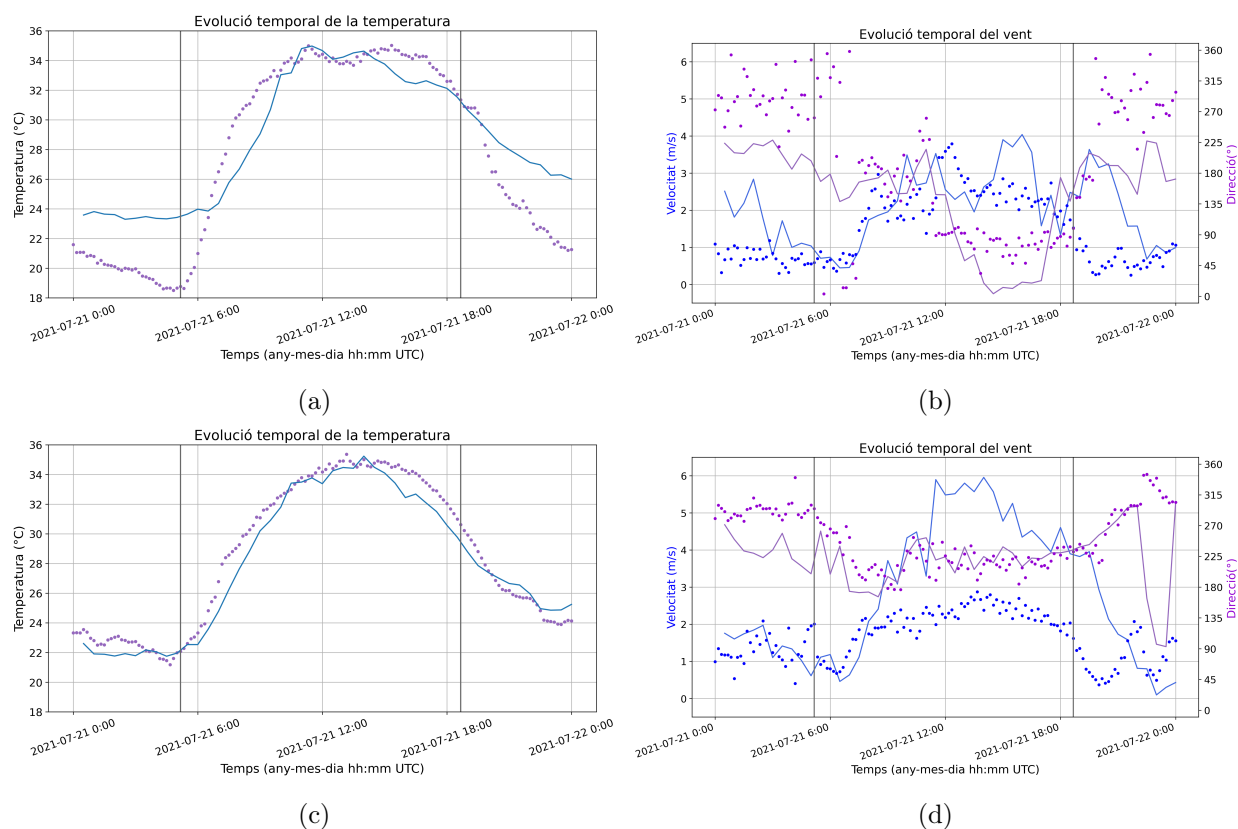


Figura 6: Igual que a la Fig.5, però per la temperatura i vent a Pontons (a i b) i Lloseta (c i d).

A la Fig.6 es presenten les sèries temporals per dos casos de terreny complex, amb el propòsit de d'examinar com afecta aquest a la bondat dels resultats obtinguts per la simulació.

En el cas de l'estació de Pontons, la temperatura durant el dia s'ajusta bé a les dades experimentals. No obstant, durant la nit la simulació registra temperatures més càlides de les que són

realment. Aquesta és una limitació coneguda dels models atmosfèrics en zones de terreny complex. Durant la nit, els models tenen dificultats per reproduir els vents amb calma (per exemple, inferiors a 0.2-0.5 m/s) i els vents simulats són lleugerament superiors als observats. Aleshores, el refredament en capes baixes de l'atmosfera és menys intens que l'observat ja que en els models l'augment del vent romp la intensitat de la inversió de temperatura superficial. Seguim tenint igualment l'augment de temperatura característic fins a les 1200 UTC. Els resultats de la direcció de vent no són realistes. El gir de vent durant l'embat el llegeix com si estigues a la plana (entre 0 i 45°), però degut al terreny les observacions ens diuen que en realitat tenim una direcció de 90° (purament est). A més, encara que es veu un augment del mòdul durant les hores de l'embat, aquest és 1 m/s més intens que l'observat. Aquestes discrepàncies en els resultats es podrien justificar a partir de què el model no té ben representada la topografia de la zona. És possible que el model consideri aquesta zona de la serra de Tramuntana més suau del que és realment, permetent així que la brisa que es genera a la badia de Pollença (vent de nord, com el vent simulat) arribi fins la d'Alcúdia a través d'aquest pas. La realitat és que el terreny és complex i no es permet aquesta entrada, sinó que el vent a l'estació de Pontons és de l'est, corresponent a l'embat generat a la conca d'Alcúdia.

Per altra banda, a l'estació de Lloseta, el terreny no és pla, però no tan complex com a Pontons. Aquest fet es manifesta en els resultats de la simulació. Reprodueix perfectament tant l'evolució de la temperatura com la direcció del vent. Únicament el model prediu un augment en el mòdul del vent molt significatiu, que encara que existeix no és en realitat tan evident.

Els resultats mostren que podem utilitzar el model per fer el nostre anàlisi de l'embat a la conca d'Alcúdia, però s'ha d'anar en compte amb les zones de terreny complex. Per estudiar els mecanismes físics a la zona de Pontons segurament caldrien resolucions horitzontals més altes que la de 250 m que hem considerat, per tenir més ben caracteritzada la topografia de la zona. Però això està fora de l'objectiu del treball. És per aquest motiu que ens centrarem en estudiar la propagació del front de brisa a través de la plana, que sí que el model descriu com la realitat.

3.1.3 Validació emprant el conjunt d'observacions disponibles

Per tenir una idea més general de la validesa del model, es descriu en forma de taula la discrepància dels resultats numèrics respecte de dels experimentals a partir del BIAS de cada estació. En aquest cas s'han inclòs totes les estacions més rellevants per l'estudi. Les estacions per les quals s'ha realitzat aquest càlcul són les de Sineu, Inca, Binissalem i Sa Pobla per el cas de AEMET+EDAR. En el cas de AGRO, el mean BIAS s'ha determinat per les estacions de Gabellí, Filicumis, Pontons i Lloseta. Els resultats dels mean BIAS de cada zona i per cada variable es mostren a la Taula 2.

	T [°C]		q [g/kg]		vent [m/s]		direcció [°]	
Total	0.5	-0.4	-1.1	-0.5	1.1	0.5	1	1
Dia	0.0	-0.3	-2.6	-1.8	1.7	0.8	-13	9
Nit	1.9	0.9	-0.3	0.4	0.3	0.6	-103	-11

Taula 2: Diagnòstic BIAS per les dades de simulació i observacions. Les dades en negre corresponen a les estacions AGRO i les dades en blau a les estacions AEMET+EDAR. El dia correspon a les 1100 UTC fins les 1500 UTC i la nit a les 2200 UTC fins les 0200 UTC.

En general, els BIAS de les estacions AGRO són majors que els de la resta, especialment en els casos de temperatura durant la nit i la direcció, que coincideixen amb el que s’havia analitzat a partir de les figures de sèries temporals. En el cas de les estacions AEMET i EDAR, s’obtenen BIAS menors o al voltant de 1, mostrant la bondat de la simulació.

Es torna a confirmar com, per les estacions que se troben al Pla, el model s’ajusta millor a la situació de brisa real, sent els seus BIAS significativament més petits que els de les estacions AGRO, les quals es troben totes en terreny muntanyós. Per aquest terreny complex, el model presenta més dificultats per produir resultats realistes. Aleshores l’estudi es centrarà en estudiar la propagació del front de brisa a la plana a través de la simulació, ja que és on els resultats són més realistes.

3.2 Estructura horitzontal del front de brisa

A partir de l’anàlisi dels talls horitzontals obtinguts de simulació, és possible descriure les característiques de la brisa en les condicions topològiques específiques de la conca d’Alcúdia i com evoluciona en el temps.

3.2.1 El front de brisa a l’estat estacionari

Per poder confirmar el bon comportament de la brisa al domini 2 (més general) de Mallorca, s’ha elegit les 1300 UTC perquè com hem vist a les sèries temporals és un dels moments on l’embat és més intens (fase de maduresa de la circulació, veure Fig.5 i 6).

Per aquest motiu, s’han representat a la Fig.7 els camps horitzontals de temperatura potencial i humitat específica juntament amb vectors de vent.

Es poden observar 3 fronts de brisa diferenciats a cada una de les 3 conques principals de Mallorca: Palma, Campos i Alcúdia. L’embat és present a les tres en aquesta hora i la seva circulació és consistent amb línies de corrent de la brisa marina desenvolupada a l’illa de Mallorca que apareix a la Fig.2a.

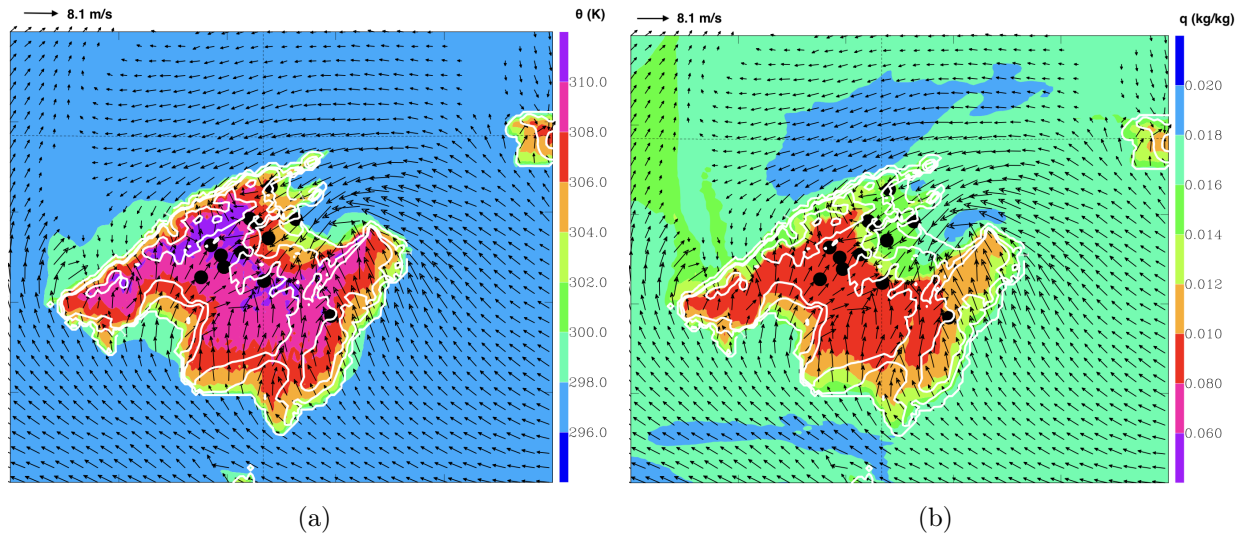


Figura 7: Camps horitzontals del domini 2 de: (a) temperatura potencial (K) i vectors de vent i (b) humitat específica (g/kg) i vectors de vent. Ambdós corresponen a les 1300 UTC del dia 21 de juliol de 2021. El domini de coordenades de la figura coincideix amb el de la Fig.3b. (Mallorca).

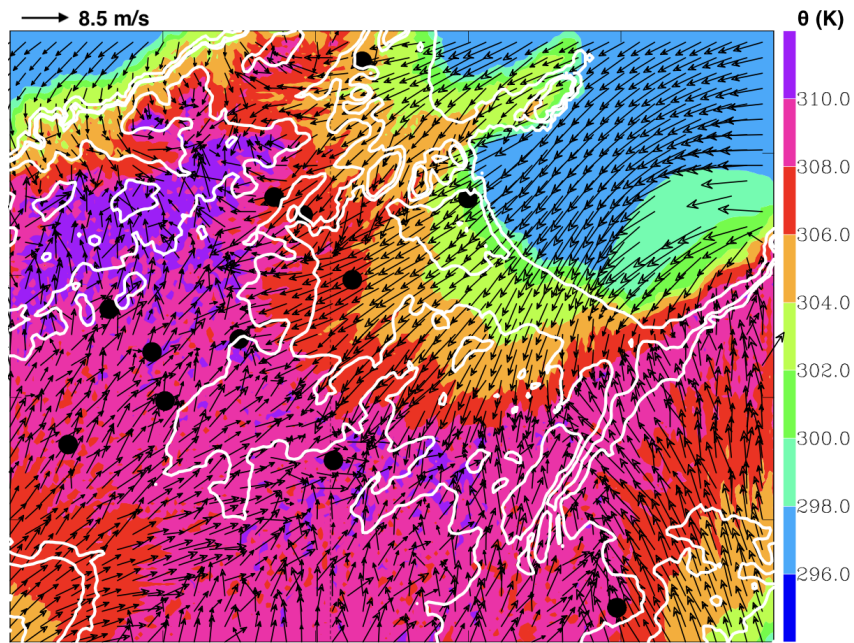
A la conca d'Alcúdia és on es troba l'embat més intens. En els 3 casos els fronts provoquen una disminució de temperatura i augment d'humitat, però aquests són més pronunciats a la conca d'Alcúdia. Cal destacar el gir de vent que es produeix a la costa nord de la serra de Llevant, que s'introdueix cap a la badia d'Alcúdia, sumant-se així al fenomen de brisa desenvolupat. A les conques de Palma i Campos, degut a les seves topografies, els fronts poden arribar més enfora (cap al centre de l'illa).

Es pot observar com la brisa penetra més a la serra de Llevant que a la serra de Tramuntana. Pot ser per l'altura de les muntanyes, però també perquè la brisa al llevant de Mallorca en aquesta cas té la mateixa direcció que el vent general en superfície (del SE).

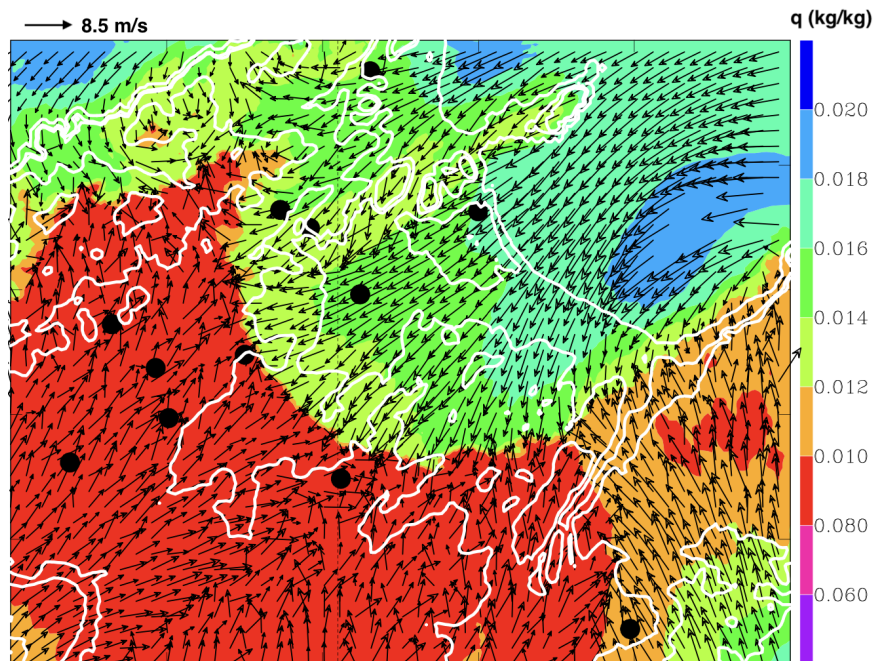
Ara ens centrarem a la zona de la conca d'Alcúdia amb el domini 3, per estudiar el comportament i l'evolució horitzontal en aquest. A la Fig.8 es mostren els camps de vent, temperatura potencial i humitat específica a nivells baixos per mostrar com és la circulació a capes baixes un cop la brisa s'ha format.

És evident la presència a les 1300 UTC d'un vent intens dirigit des de la badia cap a l'interior en direcció perpendicular a la costa. A part dels mòduls de vent, que arriben fins als 8.5 m/s, la temperatura i la humitat són grans indicadors del pas de la brisa a través de la conca.

Es poden veure forts gradients a l'interior a les zones on arriba la brisa en aquest instant. Pel que fa a les temperatures, les diferències poden arribar fins als 10 K i en el cas de la humitat, les diferències assoleixen els 0.008 kg/kg.



(a)



(b)

Figura 8: Igual que la Fig.7, però pel domini 3.

A les 1300 UTC, per tant, la brisa ha arribat fins uns 20 km cap a l'interior de l'illa, on interacciona amb altres vents, de sud i sud-oest. Aquests es tracten de les brises de Palma i Campos, respectivament, que xoquen amb la d'Alcúdia a la línia de convergència a l'interior de l'illa.

Es pot apreciar la creació de brisa a la badia de Pollença, al nord de la d'Alcúdia, que a més de tenir mòduls més petits, no és capaç d'avançar cap a l'interior de l'illa, ja que troba en la seva trajectòria la serra de Tramuntana. Degut a la seva altitud, la serra actua com a barrera i no deixa avançar la brisa.

Un procés similar ocorre a les fronteres de la conca d'Alcúdia, formades per les serres de Tramuntana al nord-oest i de Llevant a l'est. En quant la brisa es posa en contacte amb aquestes perd intensitat i canvia de direcció, sent incapaç de travessar aquestes barreres topogràfiques.

Cal destacar que es veu com la humitat és un bon traçador per indicar fins a on arriba el front de brisa en un instant donat. Es pot concloure que la brisa és una advecció freda i humida.

3.2.2 Descripció del cicle diürn

Per estudiar l'evolució del cicle de brisa a la conca, s'han representat també els camps horitzontals per altres hores significatives, tal com es mostra a la Fig.9.

A les 0200 UTC, hi ha un vent poc intens de terra a mar cap a la badia d'Alcúdia. Es tracta del vent de terral que té la mateixa direcció que el de major escala. A les 0900 UTC, ja no hi ha indicis de terral i a mesura que la radiació que arriba del Sol es fa més intensa, augmenten la temperatura i disminueix la humitat (gràcies a l'evaporació). No hi ha una direcció de vent predominant sobre la resta, encara que a la costa la circulació de brisa es comença a formar. A les 1300 UTC es veu com el front de brisa avança cap a l'interior i la temperatura disminueix i la humitat augmenta (tal com s'ha descrit a la Fig.8). Finalment, a les 1800 UTC, desapareix la brisa marina a mesura que la diferència de temperatures entre terra i aigua disminueix. En particular, durant aquest dia, hi ha un vent general del SE que s'escola per la serra de Llevant i fa que el decaïment de la brisa no sigui cap al terral, sinó que aquest vent de SE s'imposa durant la tarda i a l'inici de la nit. Aquest fet mostra que l'evolució de la brisa i el pas d'una fase a l'altra no és tan ideal com la descripció de [3]. No es tracta només de tenir embat durant el dia i terral durant la nit, sinó que la situació sinòptica acaba condicionant aquestes escales temporals.

Durant tota aquesta evolució, el vent general o sinòptic es manté en direcció sud-oest, com s'observa a la Fig.15 de l'annex. Això indica que en condicions de brisa el vent que es genera és local i de capes baixes, totalment desacoblat del que passa a capes altes, on el vent respon a forçaments de major escala que la brisa.

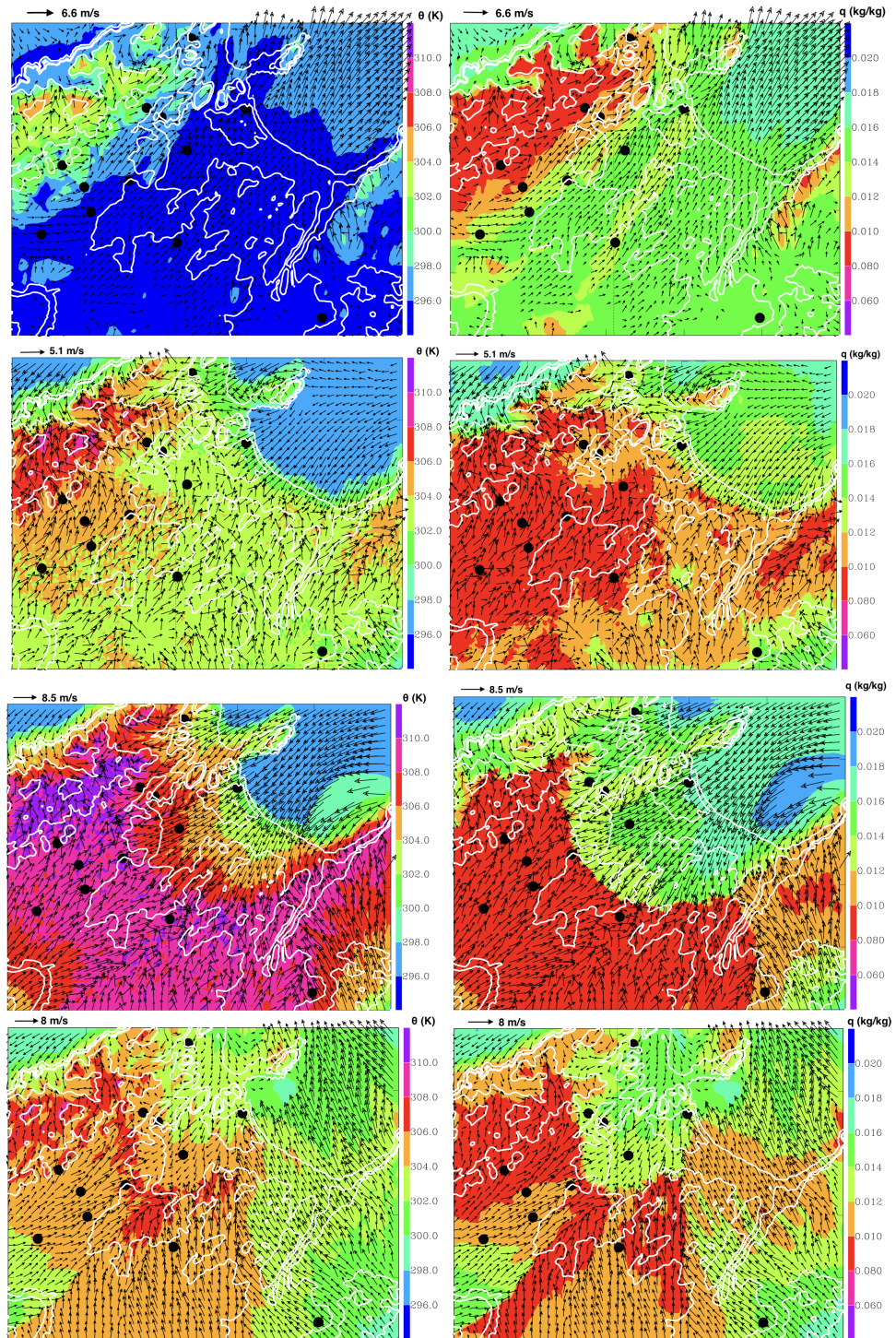


Figura 9: Igual que la Fig.8 a diferents hores: 0200, 0900, 1300 i 1800 UTC de dia 21 de juliol de 2021.

3.3 Estructura vertical del front de brisa

En aquesta secció es troba l'anàlisi de dos talls transversals d'interès: un perpendicular a la costa de la badia d'Alcúdia i, per tant, paral·lel a la direcció de la brisa (T1) i l'altre perpendicular a l'embat (T2).

3.3.1 El front de brisa a l'estat estacionari

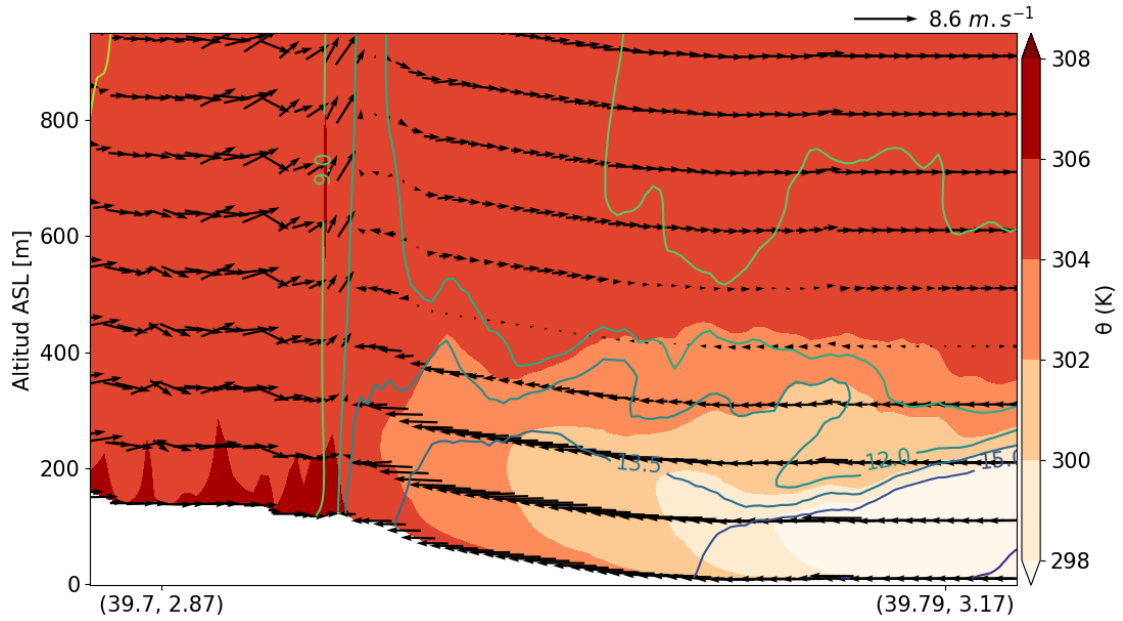
A la Fig.10 es presenten aquests talls per les 1300 UTC, per poder caracteritzar l'estructura de la brisa durant el desenvolupament. A les figures apareixen la topografia (sobre el nivell de la mar, ASL en Anglès), les projeccions dels vectors del vent en la direcció del tall, el mapa de colors de temperatura potencial i les línies d'humitat específica (en g/kg). També es mostren les coordenades dels punts inicial i final de cada tall.

Únicament es representa la topografia fins una altitud de 800 m per el T1 perquè volem capturar el front de brisa i a més altitud tenim vent general que es manté arribat a certa altura. Al T2, al tractar-se d'un tall transversal del centre de l'illa, representam fins una altitud més elevada (d'uns 1200 m), per veure si tenim dues masses d'aire que hi entren.

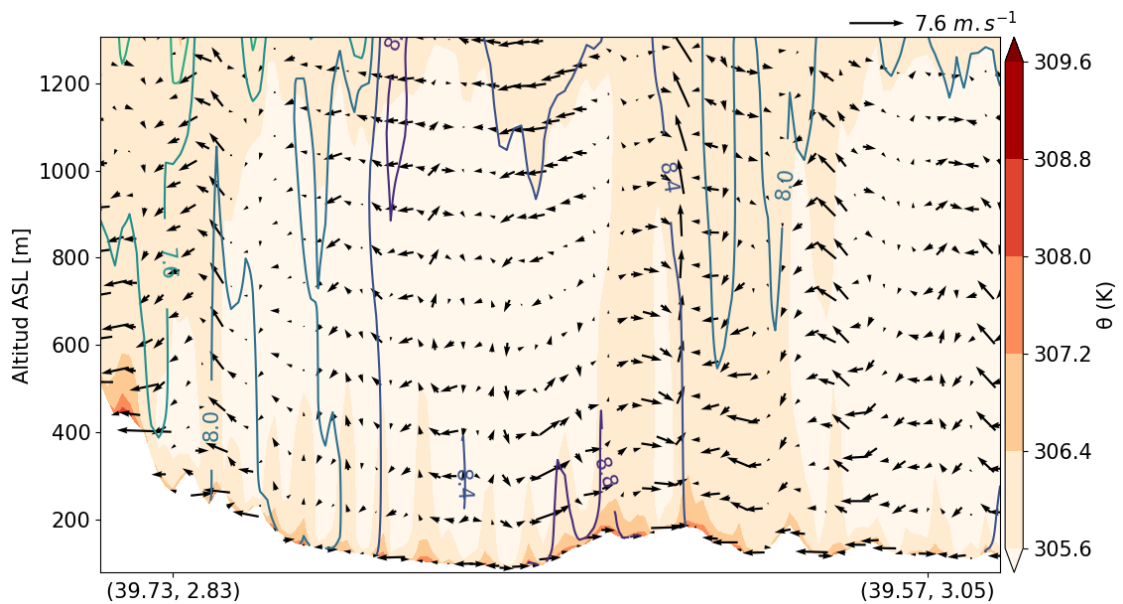
En el cas del primer tall, es veu clarament el front de brisa a les 1300 UTC amb direcció de nord-est. Aquest correspon al que ja s'havia obtingut per el tall horitzontal al domini 3 per la mateixa hora. Afecta als primers 400 m on tenim màxims de velocitat del vent en direcció de la mar cap a l'interior. Per sobre del front, l'aire es mou en la direcció contrària. Es tracta del vent general (Fig.15 Annex). Es veu que cap als 500 m ASL hi ha un mínim de vent, a l'altura de transició entre la brisa i el vent de capes altes.

Es registren canvis significatius en la velocitat, la temperatura i humitat específica que acompanyen el front de brisa. Tots aquests canvis es van dissipant i homogeneïtzant al centre de l'illa a mesura que s'introdueix a la plana. En el cas de la temperatura potencial, hi ha una diferència de 10 K aproximadament entre la costa i el punt més allunyat d'aquesta. D'igual manera que per temperatura potencial, la humitat específica també és un gran indicador de la brisa ja que hi ha un augment d'aquesta aprop de la costa en comparació amb la zona d'interior de 15 a 9 g/kg.

Es podria dir que a la línia d'humitat específica de 9 g/kg és on es situaria el front de brisa a les 1300 UTC. Això és degut a que és on hi ha la discontinuïtat més gran de temperatura i humitat. A l'esquerra d'aquesta, la brisa no ha arribat encara i s'observen ascensos de vent. Això a deu a que al arribar una massa d'aire més densa (amb menor temperatura i major humitat i turbulenta), l'aire que hi havia en aquella posició s'ha hagut de desplaçar per damunt. A l'interior de l'illa el vent és del sud-oest, corresponent a la brisa generada a la conca de Palma.



(a)



(b)

Figura 10: Talls transversals seguint les línies de: (a) T1. (b) T2 segons la Fig.4. Ambdós corresponen a les 1300 UTC del dia 21 de juliol de 2021. Encara que els resultats de temperatura i humitat han estat interpolats agafant tots els punts, els vectors de vent són cada 10 grid points i corresponen a la projecció del vector de vent (3D) al pla del tall vertical.

El segon tall (T2), es tracta d'un tall al qual arribaria de forma perpendicular el front de brisa.

La importància o intenció d'estudiar aquest tall és veure com es manifesta la brisa a l'interior de l'illa i analitzar quines de les brises de les 3 conques hi arriben i amb quina força.

Com hem vist al T1, les 1300 UTC es tracta de l'hora on la brisa es troba més desenvolupada: major intensitat de vent i canvis més significatius en temperatura i humitat. No obstant, a la distància terra endins del tall (mirant la Fig.4, va des de l'estació de Filicumis fins quasi el límit de latitud inferior del domini i, per tant, no és proper a la costa), en el cas del T1 per la mateixa hora, el front de brisa no havia arribat. A més es tracta d'un dels límits de la zona que havíem definit com a zona d'interès del treball.

Encara que a T2 a les 1300 UTC no hi arriba la brisa provinent de la badia d'Alcúdia, trobam heterogeneïtats o discontinuïtats en la temperatura i humitat. Per la part de menor altitud (plana) trobam una disminució de temperatura potencial de 1 K i, per la humitat específica, un front més humit, passant de 7.6 a 8.8 g/kg. Aquesta diferència és molt més feble i no és comparable amb la del front de brisa al T1. Per aquest motiu, es pot assumir que aquestes diferències es deuen a l'arribada de brisa marina de la conca de Palma. La massa d'aire deguda a la brisa de Palma que arriba al tall T2 no presenta tanta discontinuïtat com la brisa generada a Alcúdia, possiblement perquè la brisa a Palma és menys intensa i el front viatja més lentament, evitant gradients de temperatura i humitat tan forts com a Alcúdia. Als límits diferenciats d'aquesta brisa feble provinent de Palma, es produeixen ascensos i descensos. Aquests apareixen al ajuntar-se o interaccionar dues masses d'aire de condicions diferents de densitat. A la zona més propera del tall a la serra de Llevant també trobam un front molt feble similar al de la plana que podria arribar de l'embarcament format a la conca de Campos.

3.3.2 Descripció del cicle diürn del front de brisa

Per entendre millor el cicle de propagació de la brisa a la conca d'Alcúdia, s'analitza l'evolució temporal dels dos talls, a hores clau del seu desenvolupament, tal com s'ha fet a la Fig.9.

En el cas del tall 1, a les 0200 UTC es pot trobar vent en direcció contrària a l'embarcament de les 1300 UTC, és a dir, en direcció sud-oest i amb menor intensitat. Es tracta del vent general, encara que sabem que si es realitza un zoom a capes baixes, s'observaria el fenomen del terral, que és contrari a l'embarcament i en aquest cas tendria la mateixa direcció que el vent general. La humitat es concentra a capes baixes, essent més important a la zona central de l'illa. A les 0900 UTC, es comença a crear el front de brisa més fred i humit a la costa i a nivells baixos. La diferència de temperatura i humitat entre l'interior de l'illa i l'aigua de la badia encara no són significatius. A les 1300 UTC, la brisa actua sobre la conca com s'ha descrit a la Fig.10. Per últim, a les 1800 UTC el front de brisa es desfà i ja no es pot apreciar. No obstant, encara que queda una mica d'influència en quant a temperatures més baixes i humitats més altes. Aquestes són més homogènies al llarg del tall vertical i arriben fins a major altitud.

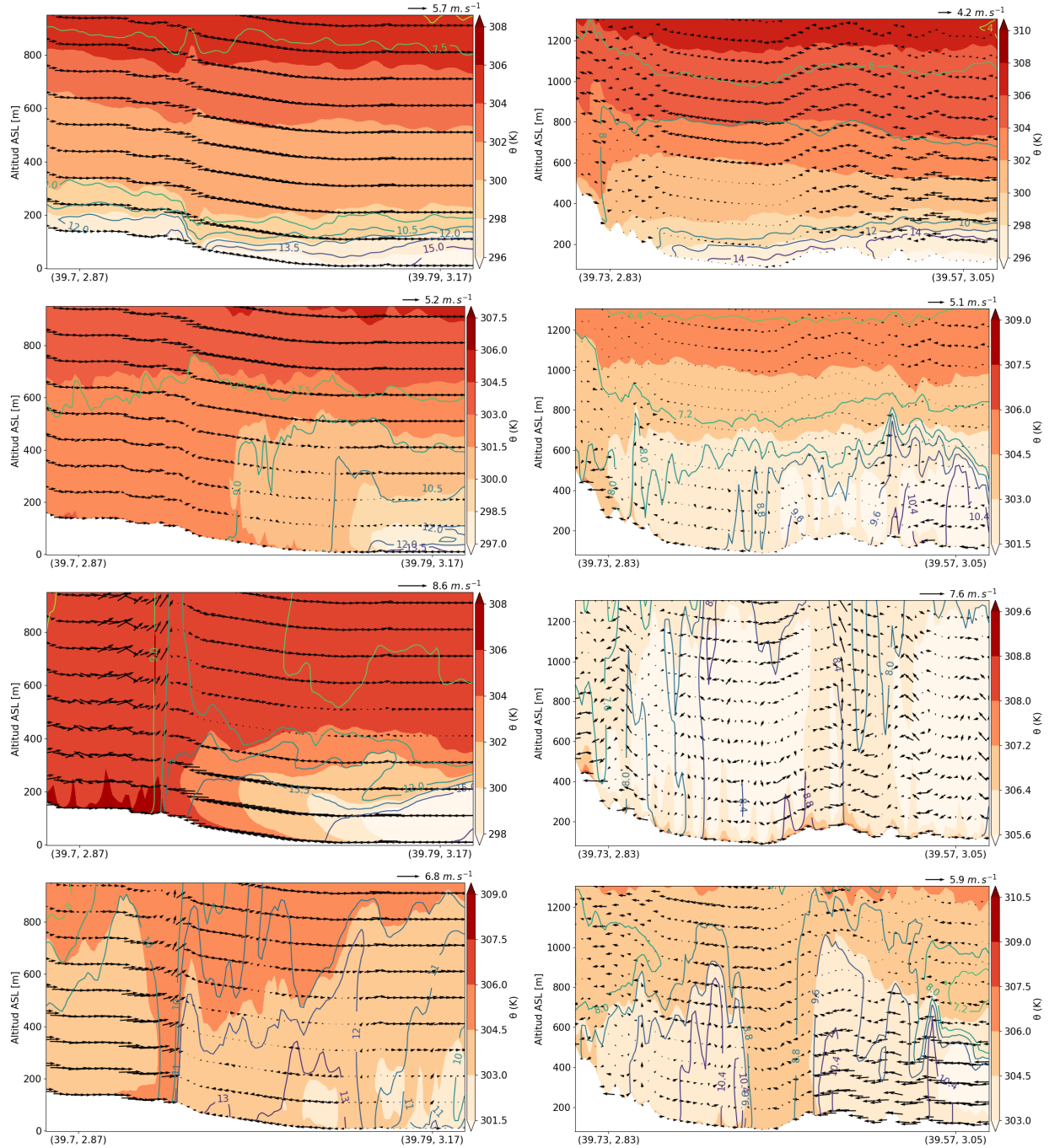


Figura 11: Igual que la Fig.10, però a les 02:00, 09:00, 13:00 i 18:00.

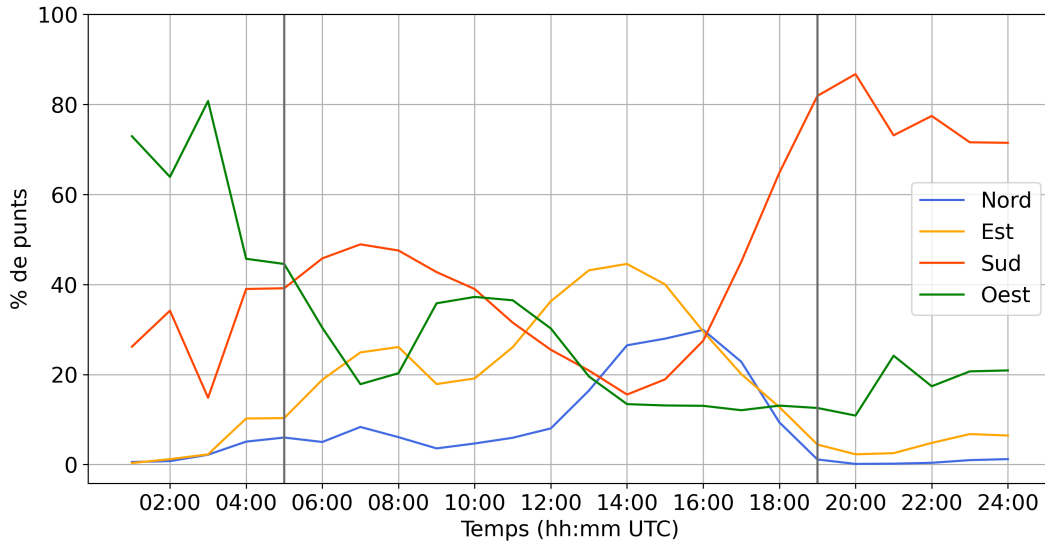
De la mateixa manera, el tall 2 té un comportament molt similar al tall 1 a les 0200 UTC, amb presència de vent general. A les 0900 UTC no es pot distingir encara l'efecte de l'embat. Això es deu a que arribarà, com hem vist a la Fig.11, la brisa de Palma, però aquesta és molt feble i encara

no es pot apreciar. A les 1800 UTC es pot veure com el vent de major escala del SE arriba al centre de l'illa. Es tracta d'un vent humit però intens, per aquest motiu no es pot associar a cap vent d'origen local. Als pendents de la serra de Tramuntana encara es pot notar l'efecte de la brisa ja que aquest vent no ha arribat encara.

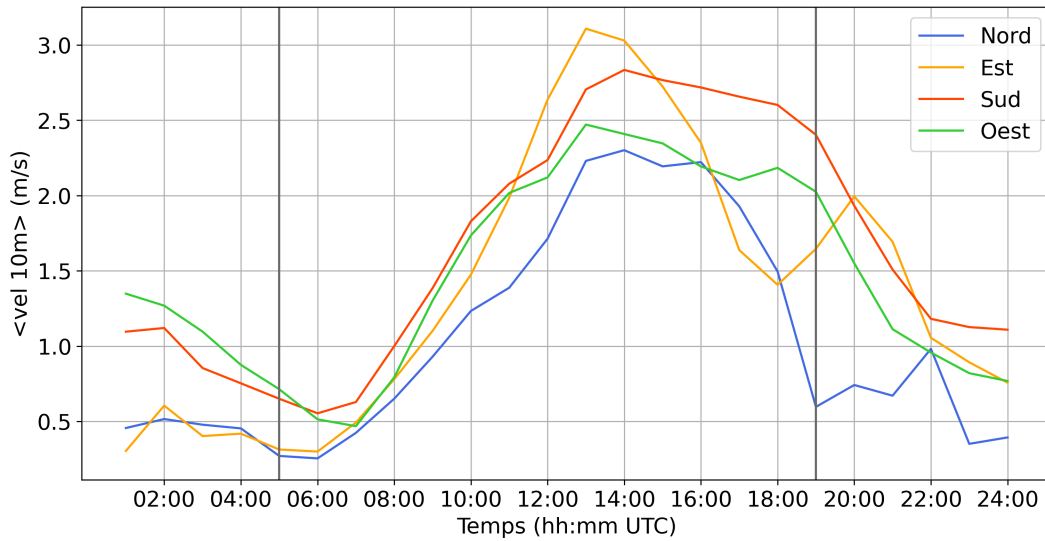
3.4 Diagnòstics per l'anàlisi de la propagació del front brisa a la conca d'Alcúdia.

En aquesta secció, es presenten les evolucions temporals del percentatge de punts de cada tipus de vent, així com el de les magnituds meteorològiques de mòdul de vent, temperatura potencial, humitat específica i els termes de l'equació de balanç energètic. Per analitzar els resultats obtinguts, definim l'orientació o direcció de la brisa en la conca d'Alcúdia com un vent de nord-est, mentre que el vent general en aquest dia és de sud-oest.

A la Fig.12 es mostren les sèries temporals del percentatge de punts de la plana per cada direcció de vent i de les mitjanes condicionades per el mòdul de vent. Durant la nit, com s'esperava, predominen els vent de sud i oest, és a dir, terral (al voltant d'1m/s en mitjana). A partir de les 1000 UTC hi ha una tendència positiva de percentatge de punts de nord i especialment d'est (brisa), amb màxim a les 1400 UTC. Els vents de N i E són els més intensos i amb percentatges més elevats a les 1200-1400 UTC (al voltant de 3m/s en mitjana), corresponents a la brisa. No obstant, durant aquest període de temps també hi ha un nombre considerable de punts de S i O. Aquest fet indica que la brisa d'Alcúdia interacciona i s'enfronta a les provinents de Palma i Campos a l'interior de l'illa i, també amb els vents de pendent de muntanya que tanquen la conca. A les 1600 UTC, el percentatge de punts amb vent de sud augmenta molt ràpidament, mentre que el dels punts de vent de nord i d'est disminueixen. Per tant, la brisa és més feble i torna a guanyar el vent general. Pot ser, aquest canvi és sobtat perquè l'arribada de les brises de Palma i Campos ajuda també al percentatge de vent de sud.



(a)



(b)

Figura 12: Evolució temporal de: (a) el percentatge de punts de per cada direcció del vent i (b) velocitat mitjana de cada direcció de vent a 10 m (en m/s).

A la Fig.13 es mostren les mitjanes de la temperatura i humitat específica a 1.5 m dels punts de la zona triada per cada direcció.

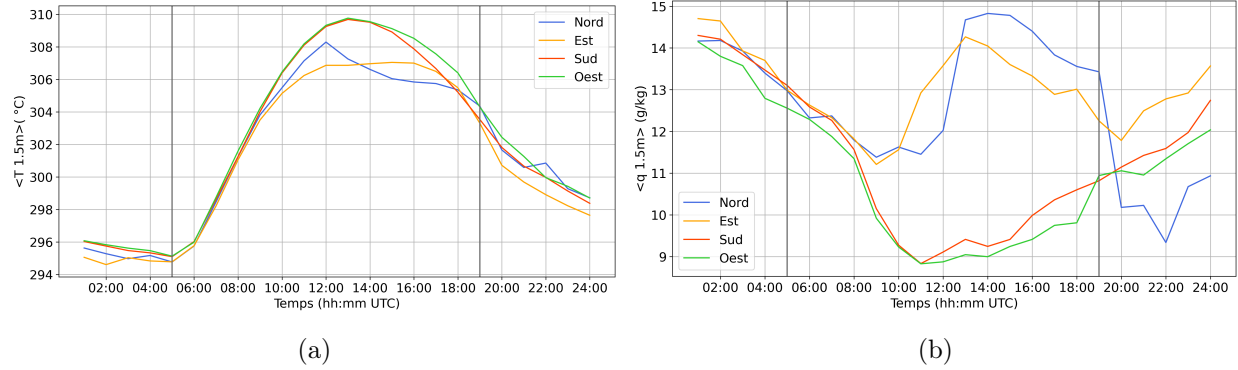


Figura 13: Evolució temporal de la mitjana de la (a) temperatura (K) i (b) la humitat específica (g/kg) per cada una de les quatre direccions de vent.

Durant les hores de la nit, sense la influència de la radiació del Sol, les temperatures són fredes i iguals per tots els vents. Per altra banda, durant les hores d'embat la temperatura augmenta per els vents de totes les direccions. Però, els vents de nord i est (les direccions de l'embat) no tenen un pic de temperatura a les hores centrals del dia tan alts com per la resta, amb diferències de fins a 2 °C. Aquest refredament confirma que el vent d'aquestes dues direccions es tracta de la brisa i resulta una advecció freda.

S'observa el mateix comportament amb la humitat específica. Durant la nit hi ha humitats altes i homogènies per totes les direccions de vent. En canvi, durant el dia, a mesura el Sol encalenteix el sòl, la humitat disminueix. No obstant, a partir de les 1000 UTC, així com als punts amb vents de sud i oest segueix aquesta tendència negativa, als vents de nord i est hi ha un augment molt significatiu en la humitat fins les 1800 UTC. Les diferències d'humitat en aquest cas poden arribar fins als 6 g/kg aproximadament. Aquest diagnòstic confirma com la brisa és una advecció humida.

De la mateixa manera que hem fet amb els camps de temperatura i humitat específica, per estudiar com canvia la interacció atmosfera-sòl en condicions de brisa es calculen les mitjanes condicionades per cada un dels termes de l'equació de balanç. Els resultats es mostren a la Fig.14.

La radiació neta té la mateixa forma durant les 24 hores pels quatre vents, tal i com s'esperava. És positiu a les hores amb radiació solar, amb un pic de 600 W/m^2 a les 1200 UTC. Contràriament és negatiu durant la nit. El flux de calor amb el sòl, G , també segueix la mateixa tendència temporal (amb el signe invertit) per tots els vents, sense cap diferència notable.

És per els termes de fluxos de calor turbulent latent i sensible, LE i H , on es pot estudiar realment l'efecte que té la brisa marina sobre el balanç. En el rang d'hores en què la brisa està en la conca, es poden apreciar diferències entre els vents d'embat (nord i est) i els de vent general (sud i oest). En el cas de LE , la brisa suposa un canvi d'uns 20 W/m^2 entre les 0800 i les 1200 UTC. Aquesta variació

va disminuint a mesura que també ho fa la brisa. A partir d'aquests resultats podem afirmar que, al tenir més vent, en el cas de la brisa no evapora més, sinó just el contrari. Aquest fet es deu a que l'arribada de la brisa a un lloc fa que en aquest la humitat augmenti notablement ja que és un vent d'origen marí.

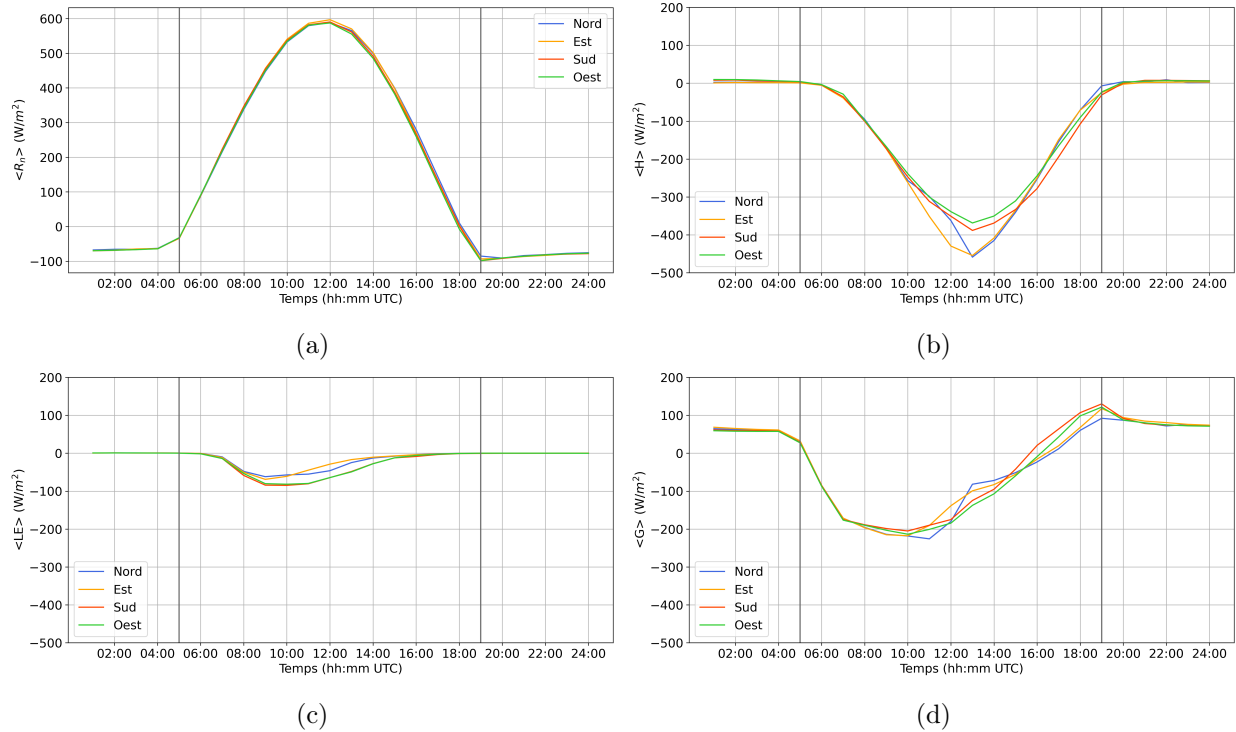


Figura 14: Evolució temporal de: (a) Radiació neta, R_n (b) Flux de calor turbulent sensible, H (c) Flux de calor turbulent latent, LE (d) Flux de calor del sol, G , de les quatre direccions de vent.

D'altra banda, en el cas de H , s'observa un canvi entre els vents d'embat i sense, des de les 1000 i les 1500 UTC, que arriba de fins a 100 W/m^2 en el seu pic. Aquest canvi comporta una major capacitat per crear remolins, deguda a la turbulència afegida per l'arribada d'aquest front de brisa turbulent.

A més, es pot comprovar com a cada moment en el temps la suma de tots els termes de l'Eq.1 és zero, tal i com s'esperava pel model, on el residu es considera nul. Aquesta és una limitació que tenen els models atmosfèrics. En condicions de terreny complex, com és el cas de l'illa de Mallorca. Aquest residu pot arribar a ser important i, per tant, representar de manera no acurada els intercanvis energètic atmosfera-sòl (tal com es descriu a [10]).

4 Conclusions

Durant la realització d'aquest treball, s'ha fet un estudi numèric de la brisa marina (o embat) a la conca d'Alcúdia mitjançant el model Meso-NH. Amb aquest objectiu s'ha dut a terme una simulació pel dia 21 de juliol de 2021, amb condicions meteorològiques òptimes per a l'aparició de brisa. La simulació s'ha fet considerant 3 dominis encaixats: Illes Balears, Mallorca i la conca d'Alcúdia.

Per començar, gràcies a les dades experimentals obtingudes a partir d'una xarxa d'estacions meteorològiques situades a la conca, ha estat possible avaluar el bon funcionament de la simulació i la precisió dels resultats obtinguts en els punts del Pla. També ha permès conèixer les limitacions de la simulació a zones de terreny complex, a prop de les cadenes muntanyoses.

Una vegada demostrat que el model dona resultats realistes, s'ha pogut obtenir una descripció de les estructures horitzontal i vertical de l'embat per les condicions específiques (la situació geogràfica i topografia) de la conca d'Alcúdia així com la seva evolució o les fases de la seva circulació. Aquest anàlisi ha estat possible gràcies a les sèries temporals, talls verticals i horitzontals estratègicament elegides. A partir d'aquest estudi s'ha mostrat que:

1. La humitat és un bon indicador per situar el front de brisa (pot ser interessant en treballs futurs).
2. L'arribada del front de brisa marina modifica els termes de la SEB (Superficial Energy Balance), demostrant l'acoblament atmosfera-sòl.
3. La brisa és una advecció freda i humida i la seva intensitat depèn del gradient tèrmic, entre d'altres.
4. L'inici i el decaïment de la brisa depenen fortament del vent de major escala.
5. La brisa interacciona fortament amb els vents de pendent generats a les muntanyes que tanquen la conca. Caldrien resolucions espacials més altes que 250 m per poder estudiar aquestes interaccions amb més detall.
6. Els diagnòstics calculats, basats en mitjanes condicionades (direcció del vent), mostren de manera clara i senzilla com és l'evolució del front de brisa.

Com a treball futur, es proposa la realització d'un estudi similar al dut a terme en aquest treball, per les dues conques principals restants de Mallorca: la de Palma i la d'Alcúdia. L'objectiu seria adquirir un coneixement cohesionat i complet dels 3 cicles de brisa marina que ocorren a l'illa de Mallorca un dia d'estiu. A més, amb aquest estudi seria possible comprovar si els augments de temperatura i humitat i la intensitat del front són semblants a les 3 conques o no. En el cas de no ser semblants es podria explorar a què són degudes les diferències.

Per altra banda, seria rellevant realitzar un estudi similar, però per un dia que no sigui d'estiu, per veure si el comportament observat i analitzat en aquest treball, es manté en unes condicions menys favorables de radiació solar.

Referències

- [1] SIMPSON, JOHN E., Sea breeze and local winds. Cambridge University Press. 1994.
- [2] RAMIS, C., AND ROMERO, R., A first numerical simulation of the development and structure of the sea breeze on the island of Mallorca. *Ann. Geophys.* 1995.
- [3] CUXART, J., JIMÉNEZ, M. A., PRTENJAK, M. T., AND GRISOGONO, B., Study of a sea-breeze case through momentum, temperature, and turbulence budgets. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 53, no. 11. 2014.
- [4] GRAU A., JIMÉNEZ M.A., CUXART J., Statistical characterization of the sea-breeze physical mechanisms through in-situ and satellite observations. *Int J Climatol.* 2021.
- [5] RAMIS, C., JANSÀ, A. & ALONSO, S., Sea breeze in Mallorca. A numerical study. *Meteorol. Atmos. Phys.* 1990.
- [6] CUXART, J., JIMÉNEZ, M.A. AND, MARTÍNEZ, D., Nocturnal Meso- Beta Basin and katabatic flows on a Midlatitude Island. *Monthly Weather Review.* 2007.
- [7] JANSÀ, J. M., AND JAUME, E., The sea breeze regime in the Mallorca island (in Spanish). *Rev. Geofis.* 1946.
- [8] JIMÉNEZ, M.A., SIMÓ, G., WRENGER, B., TELISMAN-PRTENJAK, M., GUIJARRO, J.A. AND CUXART, J., Morning transition case between the land and the sea breeze regimes. *Atmospheric Research.* 2016.
- [9] CUXART, J., CONANGLA, L., JIMÉNEZ, M.A., Evaluation of the surface energy budget equation with experimental data and the ECMWF model in the Ebro Valley. *J. Geophys.Res.Atmos.* 2015.
- [10] GARCÍA-SANTOS, V. ET AL., Study of Temperature Heterogeneities at Sub-Kilometric Scales and Influence on Surface–Atmosphere Energy Interactions, in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 2. 2019.
- [11] LAFORE, J. P., STEIN, J., ASENCIO, N., BOUGEALT, P., DUCROCQ, V., DURON, J., FISCHER, C., HÉREIL, P., MASCART, P., MASSON, V., PINTY, J. P., REDELSPERGER, J. L., RICHARD, E., AND VILÀ-GUERAU DE ARELLANO, J., The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I: adiabatic formulation and control simulations, *Ann. Geophys.* 1998.

A Vectors de vent a diferents altures

A la Fig.15 es mostren talls horitzontals per els vectors de vent junt a la topografia del domini 3. S'han fet talls per diferents altituds sobre el nivell del mar (Above Sea Level, ASL en Anglès) per estudiar com canvia la situació de brisa i la seva evolució a mesura que s'augmenta l'altitud i ens allunyam de la superfície.

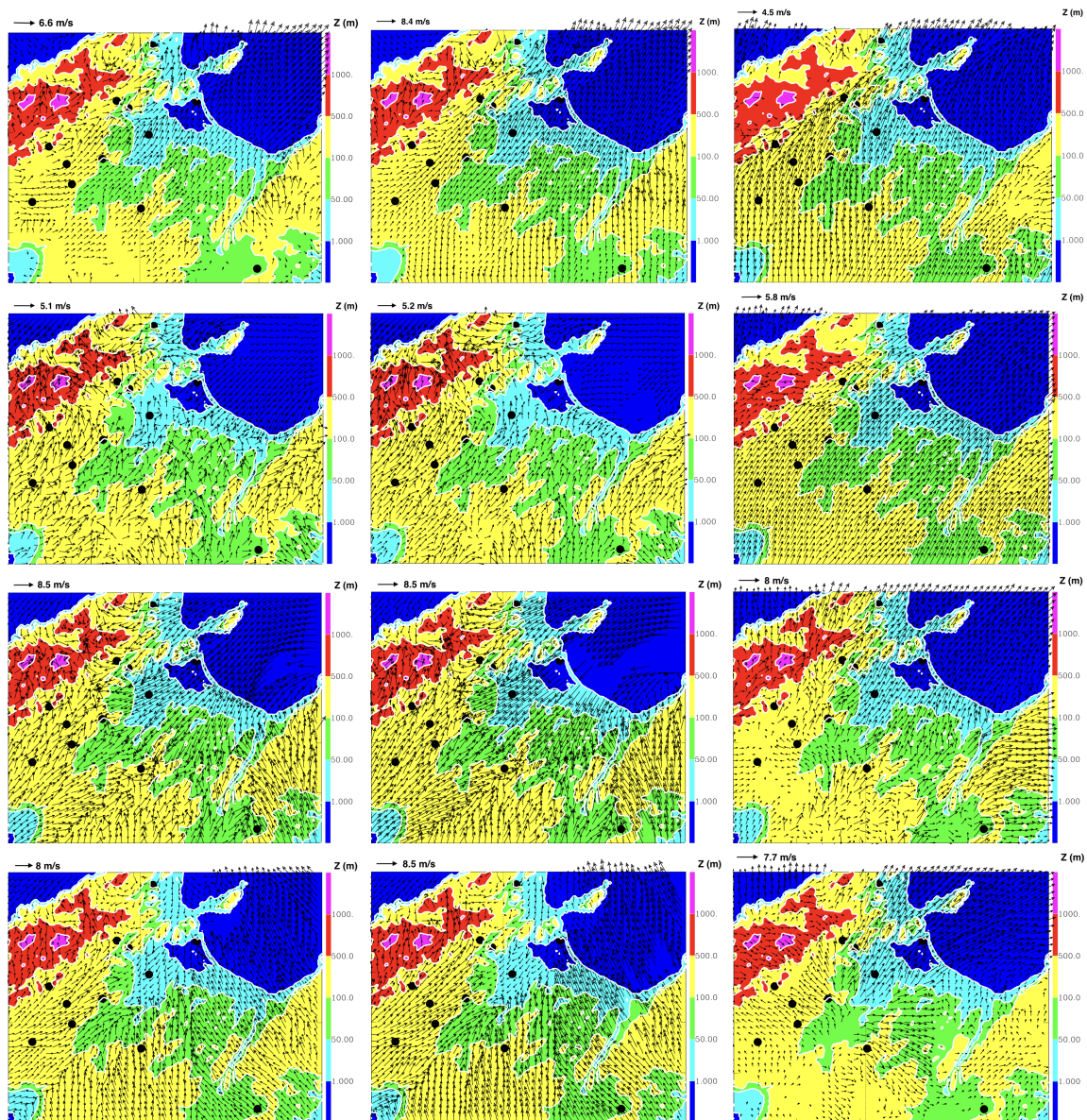


Figura 15: Vectors de vent que corresponen per columnes a altituds de 1.5 m, 98.55 m i 1208.02 m ASL respectivament. Les files corresponen a les hores 0200, 0700, 1300 i 1800 UTC de dia 21 de juliol de 2021. El domini de coordenades de la figura coincideix amb el de la Fig.4

La primera columna correspon a una altitud de 10 m i ja ha estat analitzada amb anterioritat en aquest treball. A una altitud de 98.55 m (segona columna), la brisa es comporta de forma molt similar que per 10 m, tant per la direcció del vent com pel seu mòdul. Aquest era el resultat esperat, ja que l'efecte d'embat arriba fins aproximadament els 400 m d'altitud. A la tercera columna, a una altitud de 1208.02 m es pot observar com durant tot el dia hi ha vent sinòptic de sud-oest que no es veu afectat per la circulació de brisa a capes més baixes.