



UNIVERSITAT^{DE}
BARCELONA

Reconstrucció climàtica dels darrers 2.700 anys a la Mediterrània occidental: sediments marins i estalagmites

Mercè Cisneros Bermejo



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement 4.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento 4.0. España de Creative Commons.**

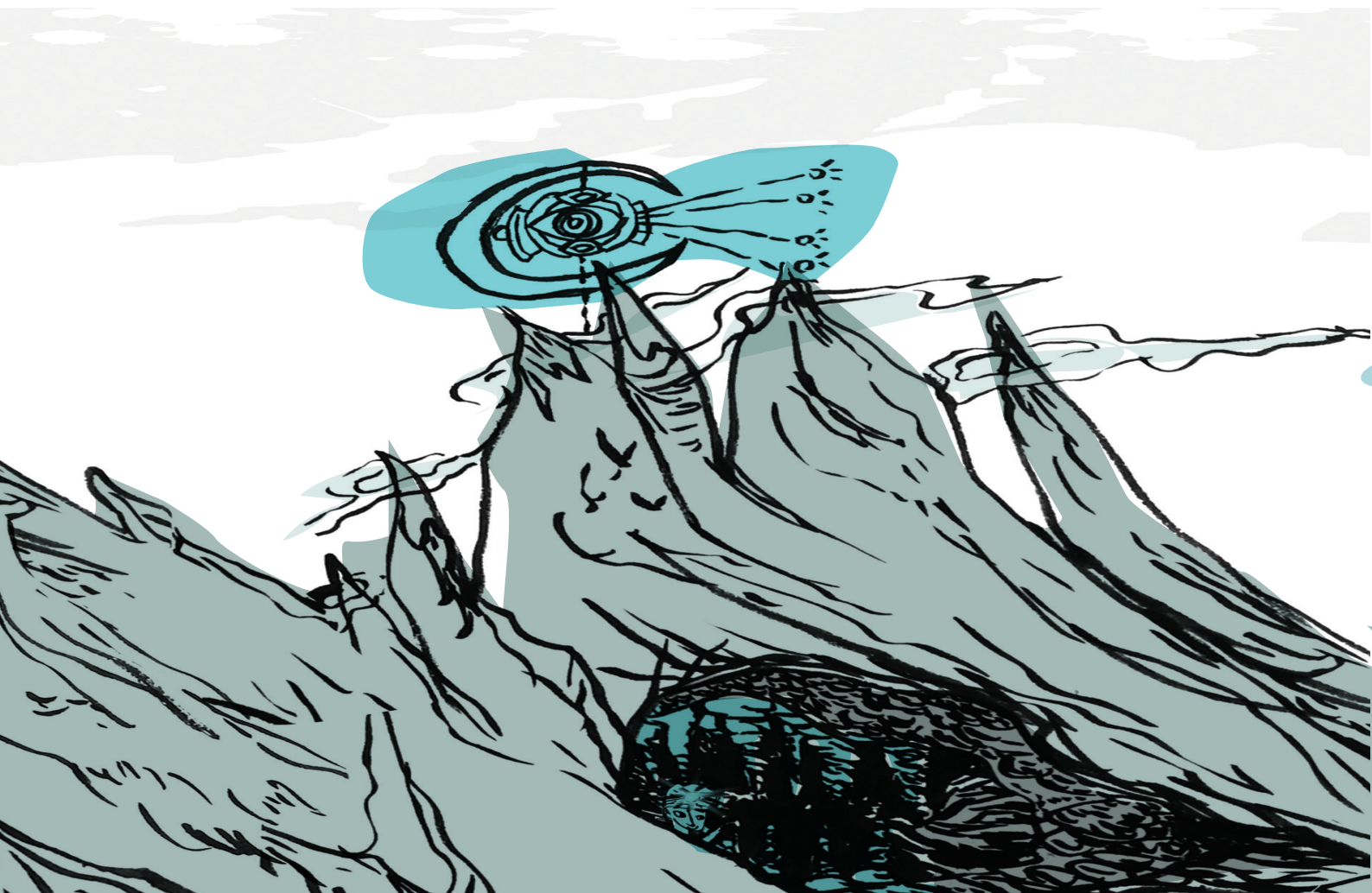
This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution 4.0. Spain License.**

CAPÍTOL 4

DISCUSSIÓ CONJUNTA

“Si no heu estat mai sota terra, dubto que entengueu el que sentia. La foscor és absoluta, gairebé tangible. T’espera més enllà de la llum per abraonar-se a sobre teu com una riuada sobtada. L’atmosfera és immòbil i viciada. No se sent res, llevat del soroll que fas tu mateix. Sents la teva respiració. El cor et batega sorollosament. I no oblides ni per un instant que hi ha milers de tones de terra i pedra a sobre teu”.

Patrick Rothfuss
El nom del vent



La present tesi es centra en la reconstrucció del clima dels últims 2.700 anys a la Mediterrània centre-occidental mitjançant l'estudi de sediments marins i espeleotemes de coves, per tal d'avaluar i entendre millor els patrons climàtics i la interacció atmosfera-mar superficial/profunda. Cal reiterar la importància d'ampliar l'enteniment sobre l'alta complexitat del sistema climàtic i dels factors que en ell intervenen, sobretot en el context de canvi global actual amb el component climàtic al capdavant.

Aquest capítol de discussió (Capítol 4) està compost per tres apartats. En el primer (apartat. 4.1), s'avaluen de forma conjunta tots els registres produïts durant la present tesi, partint de la comparació dels registres derivats de les estalagmites amb aquells derivats dels sediments marins, per a tot el període estudiat i per a cada un dels períodes climàtics/històrics per separat, respectivament. La segona part (apartat. 4.2) està dedicada a una revisió de les configuracions dels diferents patrons atmosfèrics que afecten l'àrea d'estudi d'aquesta tesi. Per últim, a l'apartat 4.4 s'ha esquematitzat el conjunt de diferents combinacions de modes de variabilitat climàtica i de patrons atmosfèrics observats durant tot el període estudiat.

4.1 Caracterització climàtica dels darrers 2700 anys a la regió central de la Mediterrània occidental

4.1.1 Tendències generals

Per tal d'avaluar els patrons climàtics a la regió Mediterrània centre-occidental, els registres de $\delta^{18}\text{O}$ derivats de les estalagmites de Mallorca (variabilitat hidroclimàtica; Cisneros et al., *in prep.*) són comparats amb les reconstruccions climàtiques derivades dels sediments marins mostrejats al nord de Menorca (SST i DWF; Cisneros et al., 2016; Cisneros et al., 2019). Així mateix, en aquest apartat també és revisada les variacions climàtiques de l'àrea d'estudi en el context d'indicadors hidrològics i de temperatura de la Península Ibèrica i Europa Central per a cada un dels períodes estudiats (apartat. 4.11-4.1.6).

De manera general i al llarg de tot el període estudiat a la regió central de la Mediterrània occidental, s'ha observat relacions no-estacionàries entre les condicions de SST, DWF i la variabilitat hidroclimàtica. Per exemple, moments d'escalfament han estat de vegades coincidents amb condicions més humides mentre que durant altres

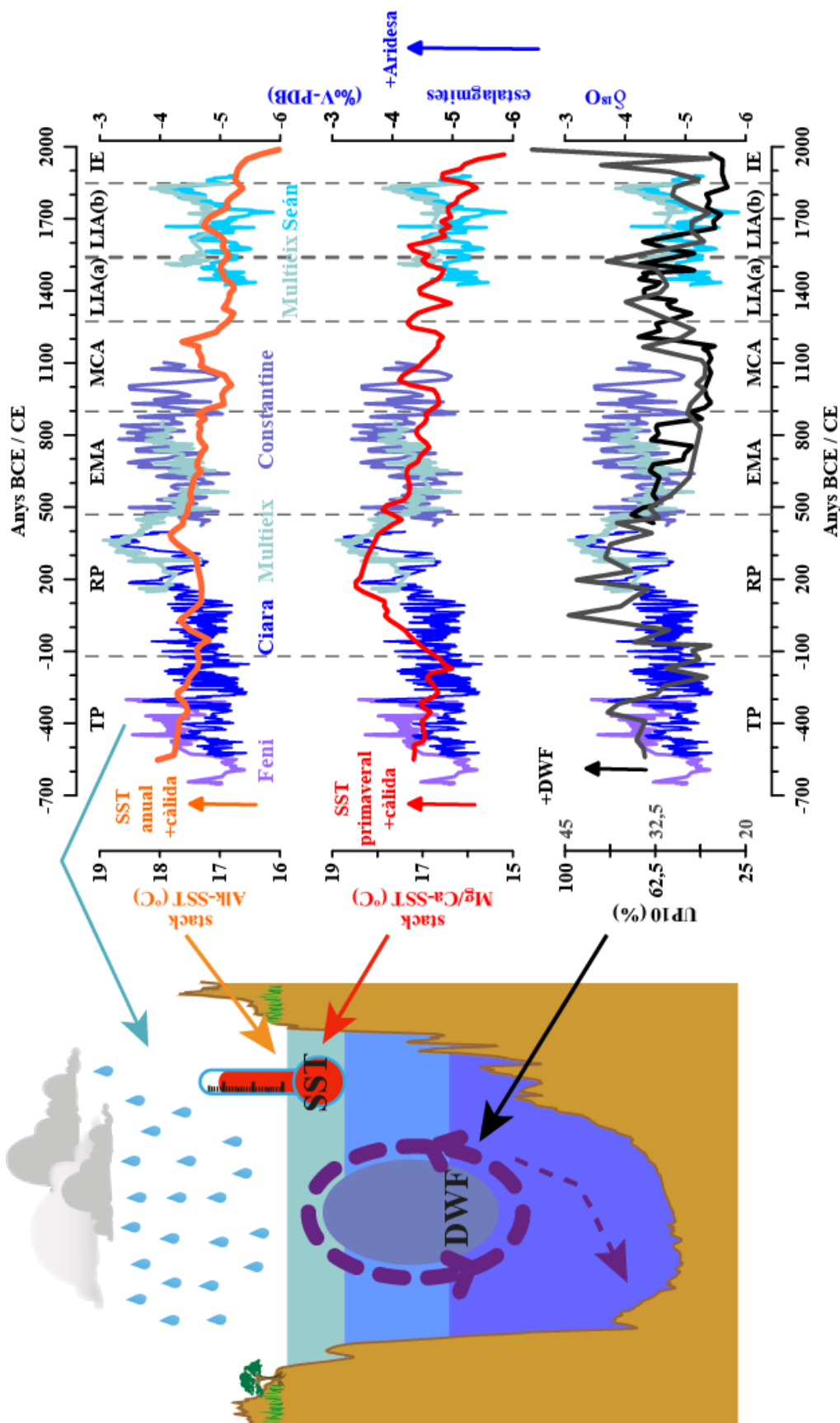


Figura 4.1. Compilació de les reconstruccions climàtiques de la regió central de la Mediterrània occidental pels darrers 2.700 anys. En blau: registres de $\delta^{18}\text{O}$ de les estalagmites de les coves de Mallorca (Cisneros et al., *in prep.*). En taronja i vermell: temperatures de la mar superficials (SST) reconstruïdes a partir de la ràtio Mg/Ca analitzada a la closca del foraminífer planctònic *G. bulloides* i a partir de les alquenones, respectivament, al nord de les Illes Balears (Cisneros et al., 2016). En negre i gris: formació d'aigua fonda (DWF) a la mar Mediterrània nord-occidental reconstruïda mitjançant l'indicador UP10 (fracció de la mida de gra $> \mu\text{m}$; Cisneros et al., 2019). També són indicats els diferents períodes climàtics/històrics estudiats pel últims 2.700 anys: TP-Període Talaotíic; RP-Període Romà; EMA-Alta Edat Mitjana; MCA-Anomalia Climàtica Medieval; LIA-Petita Edat de Gel i IE-Era Industrial. Els anys són expressats en anys abans de l'era comú (BCE) i en anys de l'era comú (CE).

moments, l'escalfament ha anat acompanyat de condicions més seques. Pel que fa a la DWF, tot i que els esdeveniments més intensos han estat sovint coincidents amb SST càlides, com durant el RP, aquesta relació no ha estat estrictament sempre així, com per exemple durant la MCA (Fig. 4.1).

Per tal d'entendre millor la relació entre DWF i SST, en el present apartat s'ha explorat el gradient alquenones-SST, les quals reflecteixen la mitjana anual de temperatures, entre el nord de Menorca (NMin) i el golf de Lleó (GoL). Aquest gradient hauria d'augmentar quan tingués lloc un intens refredament al GoL, independentment de si es tracta d'un període càlid o fred (Fig. 4.2).

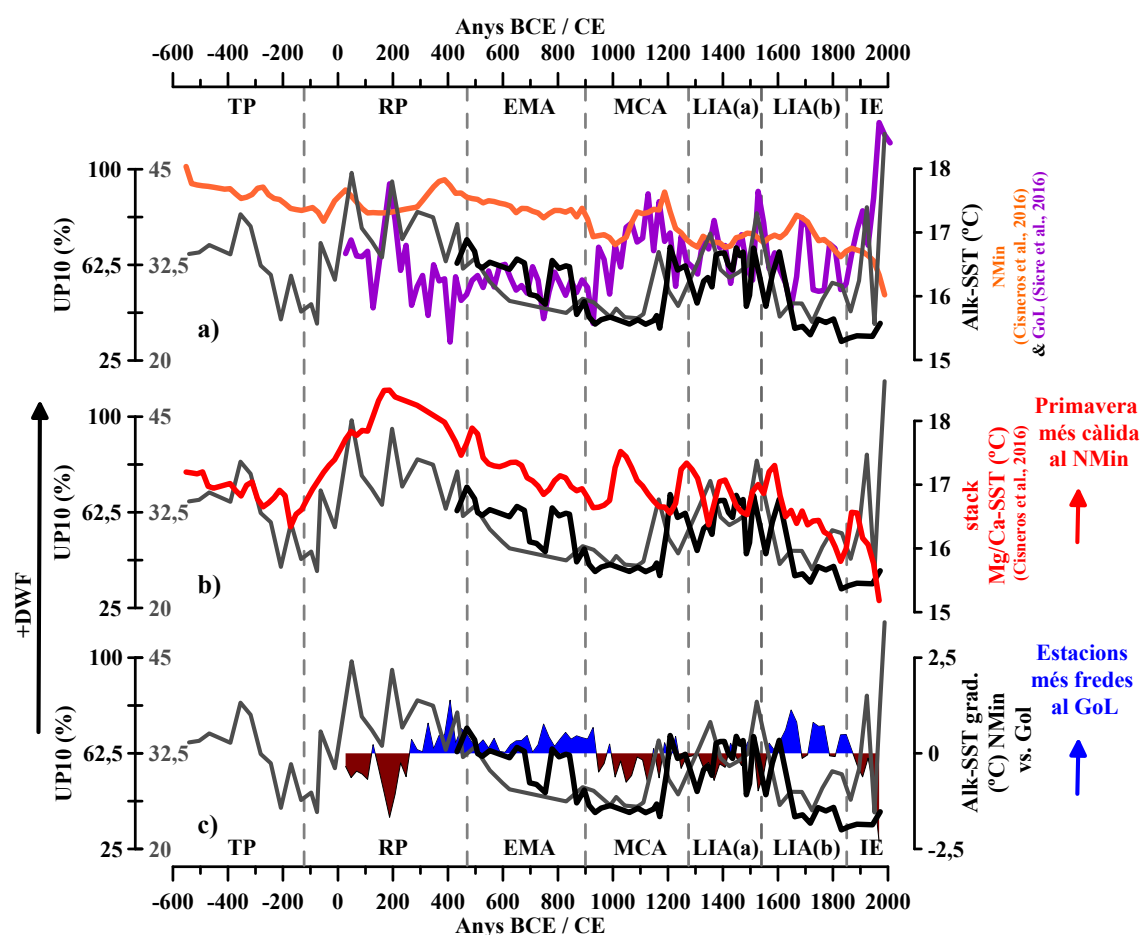


Figura. 4.2. Comparació de la variabilitat de la formació d'aigua fonda (DWF) al golf de Lleó (GoL) amb registres de temperatures superficials de la mar (SST). Els registres de DWF estan representats en negre per l'UP10 del testimoni NMin2 i en gris pel del NMin1 (Cisneros et al., 2019). **a)** SST derivades d'alquenones de la regió NMin (taronja, Cisneros et al., 2016) i del GoL plotejat a una resolució de 20 anys (lila, Sicre et al., 2016); **b)** Mg/Ca-SST de la regió NMin (vermell, Cisneros et al., 2016); **c)** Gradient d'Alk-SST: NMin menys GoL (valors positius representen SST més baixes al GoL que a NMin durant les estacions fredes). El gradient de SST és mostrat després d'eliminar la tendència de llarg termini.

D'aquesta manera, s'esperaria que el registre d'alquenones-SST de Sicre et al. (2016), mostregat a prop de la plataforma continental, capturés la variabilitat atmosfèrica al GoL mentre que el registre d'alquenones-SST de NMin respongués a una senyal més relacionada al mar obert.

Quan el gradient NMin-GoL SST mostra valors més positius (negatius), es poden interpretar SST més fredes (càlides) al GoL en comparació amb les SST a la regió NMin. Pels últims 1.500 anys, no s'ha obtingut una correlació significativa entre la DWF i el gradient de SST. Per contra, la correlació obtinguda pel RP ($r = -0.5$, $p \text{ value} \leq 0.0172$) sembla indicar que DWF més intenses (màxims UP10) van ser freqüentment coincidents amb gradients negatius, suggerint que el refredament potencial es va estendre al sector NMin.

També ha estat explorat aquest gradient considerant les SST diàries instrumentals des de l'any 2005 fins el 2015 (Fig. 4.3). Valors baixos d'aquest gradient de SST es donen durant el període més fred de l'any (hivern), podent fins i tot assolir valors negatius durant alguns anys, encara que episodis de convecció en mar obert han ocorregut indistintament tant durant gradients positius (p. ex.: 2013) com durant gradients negatius (p. ex.: 2005).

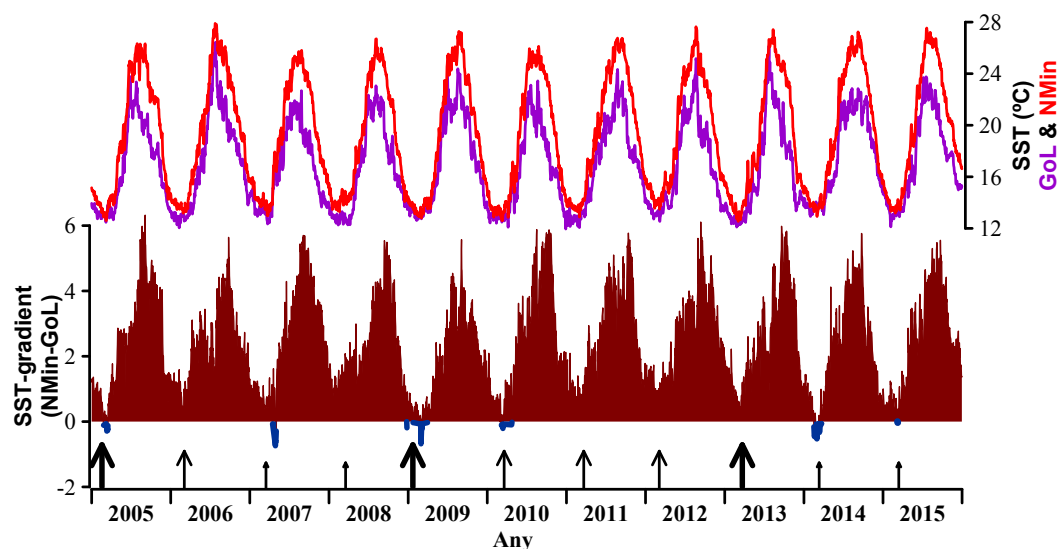


Figura 4.3. Sèrie de temperatures superficials de la mar (SST) diàries i instrumentals des de l'any 2005 fins el 2015, mesurades al Golf de Lleó (GoL) i al nord de Menorca (NMin) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/in>). El panel inferior correspon al gradient de SST entre ambdós llocs (NMin-GoL). Els anys de convecció en mar obert (Josey et al., 2011; Somot et al., 2016; Durrieu de Madron et al., 2013, 2017 i referències que allà es troben) es troben representats per fletxes (la mida és equivalent a la magnitud de l'esdeveniment).

Així, l'exploració del gradient de SST entre el GoL i el NMin corrobora que les SST semblen no haver estat l'únic factor determinant en la intensificació de la DWF durant els últims 2.500 anys. I és que els canvis en el cicle hidrològic poden ésser també crítics determinant la salinitat superficial i per tant, la intensitat de la DWF. Els resultats de la Mediterrània centre-occidental mostren una similitud significativa ($r = 0,6$; $p \text{ value} = 0$) al llarg de tot el període entre la DWF i les temperatures primaverals (SST-Mg/Ca). Aquest fet suggereix que SST primaverals més càlides van poder afavorir la pèrdua de flotabilitat deguda a l'increment de la salinitat, incrementant així el balanç E-P i, d'aquesta manera, es recolza que la pèrdua de flotabilitat no va ser deguda únicament al refredament hivernal (Cisneros et al., 2019).

4.1.2 Període Talaiòtic (TP)

Per aquest període, les estalagmites estudiades mostren valors de $\delta^{18}\text{O}$ relativament empobrits en comparació amb la resta de períodes, fet que suggereix condicions d'humitat. Tot i així, el segle IV BCE sembla ésser caracteritzat per condicions més seques. D'altra banda, la tendència general de condicions de degoteig homogènies, apuntada per la caracterització de la microestratigrafia de les estalagmites (elements arquitectònics, apartat 3.3.9), va ésser coincident amb SST relativament fredes i bastant estables reconstruïdes a la Mediterrània centre-occidental (Fig. 4.1).

Les condicions d'humitat i les SST relativament fredes observades per aquest període a la zona d'estudi són comuns a la caracterització derivada de les reconstruccions a la Península Ibèrica i l'Europa Central (Martín-Puertas et al., 2008; 2010; Morellón et al., 2009; Büntgen et al., 2011; Martín-Chivelet et al., 2011; Pérez-Sanz et al., 2013; Cisneros et al., 2016). A una escala temporal de varies dècades, les reconstruccions climàtiques disponibles per a les esmentades regions mostren una variabilitat molt semblant (Fig. 4.4).

4.1.3 Període Romà (RP)

Les remarcables taxes de creixement, els valors isotòpics relativament empobrits i les baixes ràtios obtingudes a l'estalagmita Ciara indiquen condicions més humides durant la major part d'aquest període. Tot i la certa estabilitat descrita en les taxes de degoteig mitjançant la microestratigrafia (apartat 3.3.9), condicions més seques han estat observades cap al final del RP. D'aquesta manera, la major part del RP apareix com un

període humit i amb SST càlides, mentre que condicions més seques es desenvolupen quan les SST són màximes i comença el refredament que caracteritza el final del RP (Cisneros et al., 2016). La DWF sembla haver estat intensa durant tot el RP (Fig. 4.1; Cisneros et al., 2019). SST reconstruïdes a partir d'alquenones al GoL i a la Mediterrània central indiquen també condicions càlides durant aquest període (Jalali et al., 2018).

Les condicions humides i càlides observades a l'àrea d'estudi durant el RP han estat també descrites de manera general, en algunes regions de la Península Ibèrica i l'Europa Central (Martín-Puertas et al., 2008; 2010; Büntgen et al., 2011; 2016; Martín-Chivelet et al., 2011; Nieto-Moreno et al., 2011; Moreno et al., 2012; Pérez-Sanz et al., 2013; Corella et al., 2016; Luterbacher et al., 2016) i fins i tot, en regions més llunyanes com el sud-oest de Florida (Wang et al., 2013). Contràriament, en altre regions de la Península s'han observat condicions més seques (Morellón et al., 2009; 2011; Jambrina-Enríquez et al., 2014).

Cal destacar que, tot i les condicions generalment humides i càlides descrites per aquest període en diverses regions, freqüentment les successions temporals en termes d'hidrologia i de temperatura mostren diferències entre algunes de les regions de la península. Sovint, els registres de Balears mostren una variabilitat multidecadal remarcablement comú a registres del nord de la Península Ibèrica. Alguns exemples són les coves de Cobre, Kaite i Mayor, el llac de la Bassa de la Mora (Fig. 4.4) o els llacs Enol i Arreo (Martín-Chivelet et al., 2011; Moreno et al., 2012; Corella et al., 2013; Pérez-Sanz et al., 2013). D'altra banda, també són remarcables les tendències bastant oposades entre les condicions hidrològiques de la regió central de la Mediterrània occidental i Europa central al final del RP (Fig. 4.4 a).

4.1.4 Alta Edat Mitjana (EMA)

Durant la transició RP-EMA, el pas de condicions seques a més humides (de valors isotòpics enriquits a més empobrits) és coincident amb un refredament de les SST i una reducció progressiva de la DWF a l'àrea d'estudi d'aquesta tesi (Cisneros et al., 2016; Cisneros et al., 2019). Registres costaners i deltaics del GoL i de la Mediterrània central també indiquen refredament (Jalali et al., 2018) i episodis humits (Bassetti et al., 2016). En general, l'inici de l'EMA a l'àrea d'estudi d'aquesta tesi pot ser descrit com un

període amb condicions de més humitat que aquelles observades al final del RP, lo qual és adient amb l'alt nombre de tempestes reconstruït al GoL (Degeai et al., 2015). Per contra, al final de l'EMA (a partir del segle VIII) s'han observat condicions més seques.

Les condicions relativament humides de l'EMA inicial passen a més seques mentre que les SST mostren un refredament, tendències que semblen oposades a aquelles reconstruïdes a la Península Ibèrica i Europa Central (Fig. 4.4). Particularment, condicions seques i fredes han estat descrites durant la LALIA (536-660 yr CE) a Europa Central (Büntgen et al., 2011; 2016), mentre que a l'àrea d'estudi d'aquesta tesi durant aquests anys es donen les condicions més humides i càlides de tota l'EMA.

Diferències han estat també observades en relació a les condicions hidroclimàtiques a la l'àrea d'estudi d'aquesta tesi i la freqüència de les pluges extremes al nord de la Península Ibèrica (MOI; Corella et al., 2016) des del final del RP, quan menys (més) pluges extremes són coincidents amb condicions més humides (seques) (Fig. 4.4). En particular, durant l'inici de l'EMA s'han reconstruït condicions més humides a la Mediterrània centre-occidental mentre que, al nord de la Península Ibèrica s'han descrit condicions excepcionals de freqüències molt baixes de pluges extremes (Corella et al., 2016).

Contràriament i, de manera general durant l'EMA, alguns registres de la Península Ibèrica presenten tendències similars a la zona d'aquest estudi (cap a condicions més seques/refredament) (Rodrigues et al., 2009; Pérez-Sanz et al., 2013). Específicament, s'han descrit condicions humides i fredes a la regió noccidental del nord de la Península Ibèrica (Desprat et al., 2003; Álvarez et al., 2005; Jambrina-Enríquez et al., 2014).

4.1.5 Anomalia Climàtica Medieval (MCA)

Els valors isotòpics relativament estables i els elevats valors d'elements traça observats a l'inici de la MCA, conjuntament amb les taxes de creixement mínimes obtingudes a l'estalagmita Constantine, suggereixen condicions més seques durant aquest període respecte tots els altres. Cal destacar que cap de les estalagmites efecte d'estudi d'aquesta tesi cobreix la totalitat de la MCA (ni tampoc durant la primera part de la LIA), períodes que representen un hiatus en l'estalagmita Multiex que és la que es solapa amb la majoria d'estalagmites. El període medieval és també caracteritzat a

l'àrea d'estudi per una variabilitat significant en les SST i una DWF no molt intensa, excepte per al final, quan la DWF mostra un increment (Fig. 4.1).

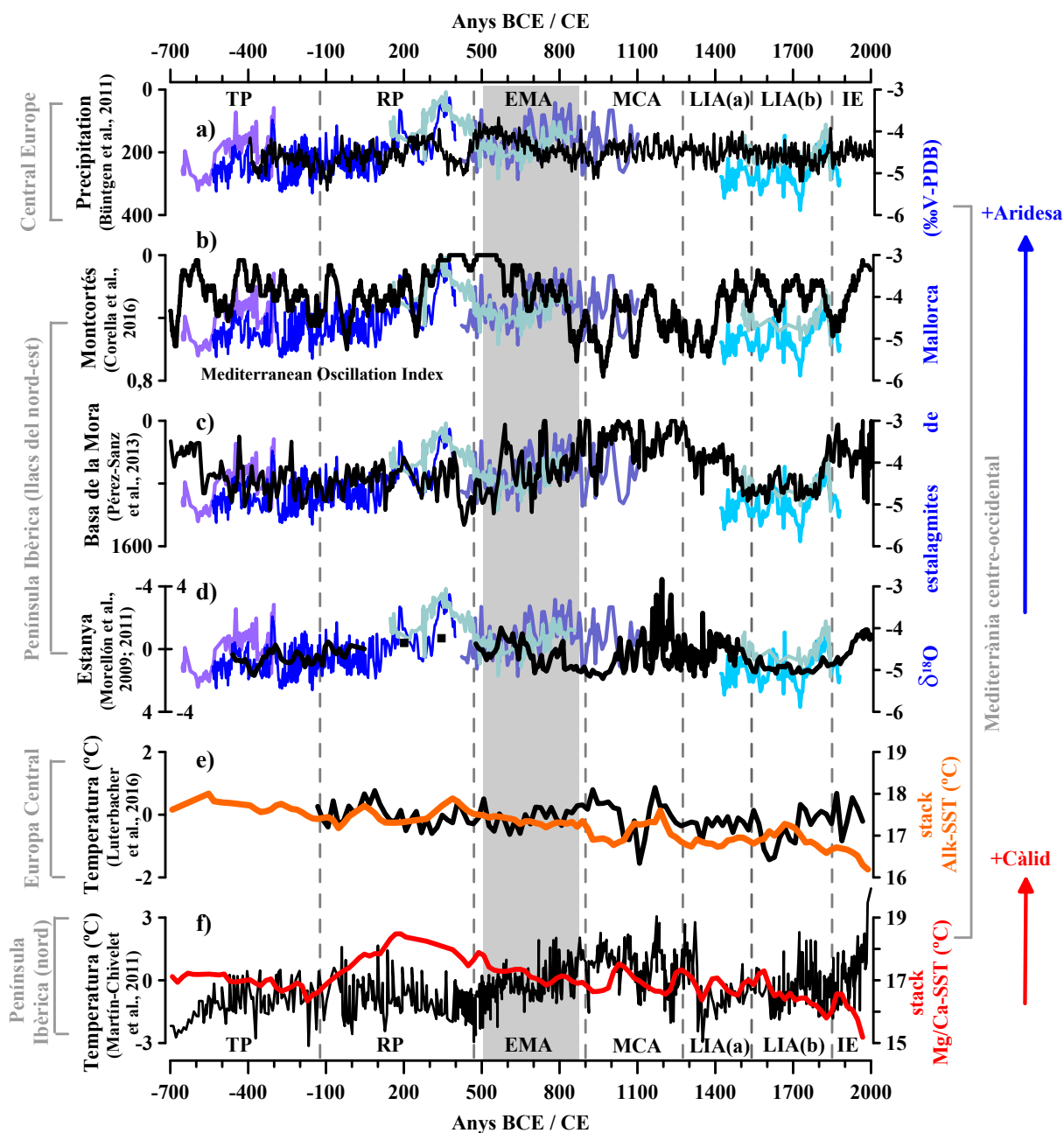


Figura 4.4. Registres de $\delta^{18}\text{O}$ de les estalagmites de la Mediterrània centre-occidental pels últims 2.700 anys (en blau; Cisneros et al., *in prep.*) comparats amb reconstruccions hidrològiques provinents de: **a)** Europa Central i, **b-d)** nord-est de la Península Ibèrica. Les SST de l'àrea d'estudi d'aquesta tesi (Cisneros et al., 2016) són també comparades amb registres de **e)** Europa Central i, **f)** nord de la Península Ibèrica.

Condicions més seques durant la MCA semblen haver estat comuns a la Mediterrània centre-occidental i a la Península Ibèrica (Morellón et al, 2009; 2011; 2012; Martín-Puertas et al., 2010; Nieto-Moreno et al., 2011; Moreno et al., 2012; Pérez-Sanz et al.,

2013). La variabilitat hidroclimàtica remarcable observada a l'àrea d'estudi durant la MCA ha estat també descrita al nord de la Península Ibèrica (Corella et al., 2016). Per contra, estius humits han estat descrits a l'Europa Central (Büntgen et al., 2011; 2016).

Respecte a les temperatures, la majoria dels registres mostren condicions càlides al nord de la Península Ibèrica i a l'Europa Central. Cal destacar però, que a la regió central de la Mediterrània occidental, durant aquest període no semblen haver-se donat SST particularment càlides o fredes (Fig. 4.4). D'altra banda, a escala temporal de segles i pel que fa a les temperatures, tendències bastant oposades respecte la zona d'estudi d'aquesta tesi han estat reconstruïdes en registres del nord de la Península Ibèrica i Europa Central (Büntgen et al., 2011; Martín-Chivelet et al., 2011; Cisneros et al., 2016; Luterbacher et al., 2016).

4.1.6 Petita Edat de Gel (LIA)

Els registres derivats de les dues estalagmites de Mallorca, que van créixer durant aquest període, suggereixen una estabilitat moderada en les taxes de degoteig i condicions generalment humides (Cisneros et al., in *prep.*). Durant el primer subperíode de la LIA (LIAa; 1275-1540 CE), la DWF va ser més intensa que durant el segon (LIAb; 1540-1850 yr CE). A escala temporal de varis segles, la LIA és caracteritzada a l'àrea d'estudi per condicions humides (valors empobrits de $\delta^{18}\text{O}$) i SST fredes en comparació a la resta dels períodes coberts pels últims 2.700 anys. Condicions fredes han estat també reconstruïdes al GoL i a la Mediterrània central (Jalali et al., 2018) així com també, episodis humits al Gol (Bassetti et al., 2016). Tot i això, tenint en compte les tendències a una escala temporal de l'ordre de dècades, condicions mes seques (humides) van ésser freqüentment coincidents amb temperatures fredes (càlides) (Fig. 4.1).

La LIA sembla haver estat caracteritzada per una distribució espacial homogènia general de les condicions climàtiques i, condicions fredes i humides han estat també descrites a la Península Ibèrica (Moreno et al., 2008; Morellón et al., 2009; 2011; 2012; Martín-Chivelet et al., 2011; Nieto-Moreno et al., 2011; Pérez-Sanz et al., 2013; Cisneros et al., 2016) i a l'Europa Central (Büntgen et al., 2011; Luterbacher et al., 2016). Tot i així, el moment i la intensitat dels canvis mostren, de nou, diferències regionals evidents (Fig. 4.1).

4.2 Reconfiguració dels patrons climàtics durant l'EMA

D'acord amb la comparació entre les caracteritzacions hidroclimàtiques i de temperatura dels registres de Balears i aquells de la Península Ibèrica, es distingeixen relacions diferents durant el RP i l'EMA de les observades durant la MCA i la LIA, destacant l'EMA com un període de transició. Per tal de comprendre millor les interaccions entre l'atmosfera i la mar superficial/profunda abans i després de l'EMA, s'han comparat reconstruccions de diferents elements del sistema climàtic incloent la ventilació de l'aigua Intermèdia Llevantina (LIW) a la conca mediterrània oriental.

La variabilitat hidrològica descrita pels registres de les estalagmites de Mallorca és coherent amb les reconstruccions de la NAO de Faust et al. (2016). Les fases persistents de NAO positiva (negativa) són coincidents amb condicions més seques (humides) (Fig. 4.5 b). De manera particular, la similitud és molt remarcable durant l'EMA. Fases de NAO positives (negatives) suposen tempestes d'hivern més freqüents i més fortes creuant l'Atlàntic en un recorregut més cap al nord, la qual cosa resulta en hiverns més càlids i humits (més freds i secs) al nord d'Europa i condicions més seques (més humides) sobre la Mediterrània (Hurrell et al., 2003). Però existeixen períodes a on la relació entre la NAO i les condicions hidrològiques a Mallorca no és tant evident,, possiblement debut a la interferència d'altres patrons de variabilitat com l'EA i/o l'SCAN que tenen capacitat per modelar la intensitat i localització del dipol de la NAO (Comas-Bru and McDermott, 2014). A més, fases de NAO negatives poden promoure una posició més cap al sud de la ITCZ, disminuint el gradient meridional de pressió i afeblint així els vents de l'oest a l'hemisferi nord que es situarien més cap al sud. La reconstrucció disponible de l'ITCZ pels darrers 2.000 anys, basada en registres d'ambdós hemisferis, descriu condicions estables pels anys 0-1320 CE als dos hemisferis i condicions molt seques ca. 1000 CE a l'hemisferi nord (Lechleitner et al., 2017). En l'esmentat estudi, la reconstrucció de la ITCZ és comparada amb la de la NAO pels últims 1000 anys (Ortega et al., 2015) i s'argumenta que durant la major part de la LIA (1320-1820 CE) la posició remarcablement més cap al sud de la ITCZ hauria promogut fases de la NAO negatives (Fig. 4.5 c). Les condicions descrites pels registres de les estalagmites de Mallorca durant la MCA (condicions seques) i durant la LIA (condicions humides), són coherents amb les esmentades observacions.

D'altra banda, la variabilitat a llarg termini dels registres de les estalagmites de Mallorca es també coherent amb el registre de tempestes reconstruït a una llacuna del GoL per Sabatier et al. (2012), però la relació sembla ser diferent abans i després de l'EMA (Fig. 4.5 d). Durant el RP i l'EMA, la tendència cap a més tempestes és coincident amb condicions més humides o seques sense distinció a l'àrea d'estudi d'aquesta tesi. Per contra, durant la MCA una menor activitat de tempestes coincideix amb condicions més seques mentre que durant la LIA, una major activitat concorre amb les condicions generals de més humitat. Cal destacar que durant la LIAb i a escales temporals de varis segles, una menor activitat de tempestes va ser coincident amb condicions més seques. A més a més, la reconstrucció regional de tempestes de Degeai et al. (2015), també realitzada a una llacuna del GoL, han documentat pel període 400-820 CE la major activitat de tot el període efecte d'estudi de la present tesi (Fig. 4.5 e).

Un dels factors primaris de control proposats per explicar l'evolució climàtica de l'Holocè és la variabilitat solar, tot i que aquesta connexió durant alguns dels períodes de l'últim mil·lenni és encara controvertida (Bard et al. 2000; Bond et al., 2001). A l'àrea d'estudi d'aquesta tesi, la major part de baixades de la TSI són coincidents amb condicions més seques o amb tendència a elles, tal i com succeeix durant alguns moments del TP i de l'EMA (Fig. 4.5 f); però també baixades de la TSI han coincidit altres vegades amb condicions més humides, com durant la LIAb.

Si hom compara la DWF de la conca Mediterrània occidental amb la ventilació de la LIW a la conca oriental (Fig. 4.5 g), pot ésser observat que fins l'EMA ambdós mecanismes semblen haver operat en fase (Cisneros et al., 2019), mentre que després de l'EMA sembla haver ocorregut un desacoblament a escala temporal multicentennial. Roberts et al. (2012) a partir de la comparació de registres hidrogràfics dels extrems de la Mediterrània suggereix un balanç (*see-saw*) climàtic mediterrani est-oest pel que fa a la precipitació des del 900 CE. Aquest treball assenyala aridesa a la conca occidental coincident amb fase de la NAO positiva persistent durant la MCA i, una situació menys clara a la conca oriental (Fig. 4.5). Estudis sobre registres de la conca Mediterrània oriental (Xoplaki et al., 2016; Gogou et al., 2016) apunten precipitacions més elevades al final de l'EMA (~700-900 CE), fet que apunta que el balanç hidroclimàtic entre ambdues conques sembla haver-se donat ja prèviament al final de l'EMA. A més, aquest balanç mediterrani est-oest en la precipitació ha estat observat també durant la

major part de l'Holocè, abans del període d'estudi de la present tesi (fins abans de l'any 2.000 BCE) (Jalali et al., 2017; Peyron et al., 2017). Possiblement, unes condicions hidrològiques més humides durant l'EMA, tal i com es pot interpretar mitjançant les estalagmites de Mallorca, van afavorir parcialment el debilitament de la DWF a la Mediterrània occidental.

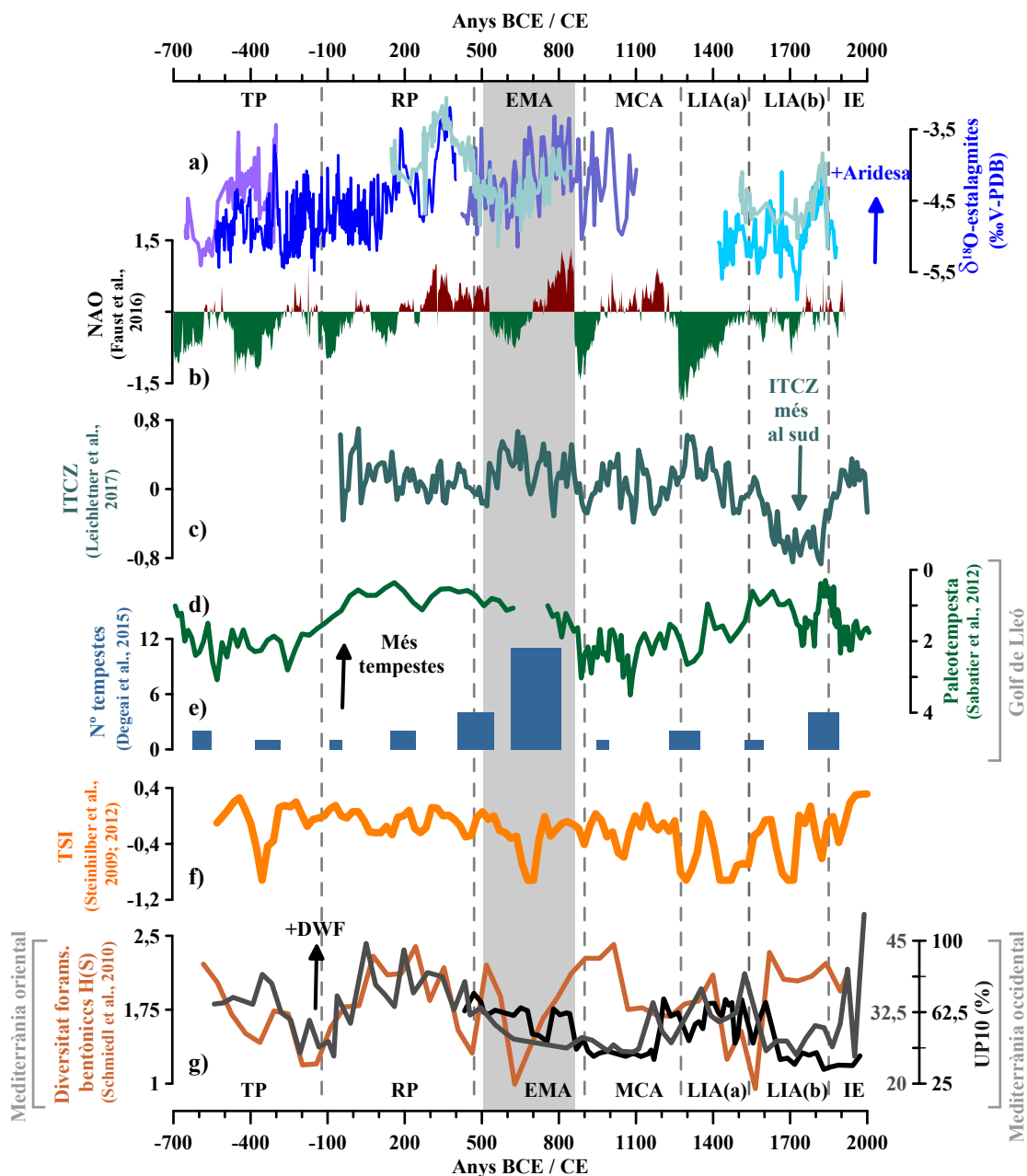


Figura 7.1. Comparació de les reconstruccions de la Mediterrània centre-occidental amb altres registres climàtics: **a)** Registres de $\delta^{18}\text{O}$ derivats de les estalagmites (Cisneros et al., *in prep.*). **b)** Oscil·lació de l'Atlàntic Nord (NAO). **c)** Zona de Convergència Intertropical (ITCZ). **d-e)** Tempestes reconstruïdes al GoL. **f)** Irradiació solar total (TSI). **g)** Reconstrucció de la formació de l'aigua fonda (DWF) a la conca Mediterrània centre-occidental (negre i gris; Cisneros et al., 2019) i ventilació de l'Aigua Intermèdia Llevantina a la conca oriental (marró; indicador H(S)).

Així, la comparació del registres de les estalagmites de Mallorca amb altres dades regionals indica relacions diferents abans i després de l'EMA. Tant la variabilitat hidrològica com la de les temperatures a la Península Ibèrica i a àrees adjacents durant el RP i l'EMA van tenir una distribució temporal molt heterogènia, mentre que durant la MCA i la LIA va dominar una major homogeneïtat regional. D'altra banda, les cel·les convectives de la Mediterrània occidental van covariar abans i durant l'EMA passant a una antifase durant els períodes més recents.

4.3 Variabilitat climàtica i patrons atmosfèrics durant els darrers 2.700 anys

Les heterogeneïtats hidrogràfiques al llarg de la Península Ibèrica han estat prèviament atribuïdes a signes de NAO/EA similars o oposats. El RP i l'EMA podrien haver estat dominats per NAO-/EA+ i NAO+/EA- respectivament mentre que la MCA i la LIA per condicions dominades per NAO+/EA+ i NAO-/EA-, respectivament. Altrament, les condicions humides interpretades amb els registres de les estalagmites de Mallorca durant el RP són coherents amb el gradient d'humitat d'oest a est descrit pel nord de la Península Ibèrica (Sánchez-López et al., 2016). Respecte al balanç en les cel·les convectives de cada conca mediterrània observat des de l'EMA, estudis previs han senyalat el paper del patró EA/WR con un factor de control important, mentre que abans de l'EMA sembla haver tingut una influència més feble (Roberts et al., 2012; Cisneros et al., 2019) (Taula 4.1). A més, quan el patró EA/WR influencia la Mediterrània, la seva fase negativa pot incrementar la DWF a la conca occidental i debilitar la convecció a l'oriental, mentre que la fase positiva actuaria a l'inrevés (Krichak and Alpert, 2005; Josey et al., 2011). Així, possiblement EA/WR- va ser predominat durant la última part de l'EMA i la LIAa i, per contra, EA/WR+ va ser predominant durant la MCA i la LIAb.

Modes negatius d'EA poden suposar la influència de vents freds i secs sobre la mar Mediterrània (Josey et al., 2011). Malgrat això, els registres derivats de les estalagmites indiquen condicions més humides (més seques) durant algunes de les fases predominants d'EA- (EA+), com la primera meitat de l'EMA i la LIAb (la segona meitat del RP i la MCA) (Taula 4.1). Per una banda, durant la primera meitat de l'EMA i durant la LIAb, tot i l'EA- predominant, probablement EA+ va ocórrer en freqüents ocasions i/o la influència de la NAO va ser més forta. A més a més, altres patrons com

| Període i anys | Temperatura Superficial de la Mar | Formació d'Aigua Fonda | Condicions Hidrològiques | Fase NAO (predominant) | Patró NAO/EA (predominant) | Patró EA/WR (predominant) |
|---|-----------------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Període Talaiòtic (abans de 123 BCE) | Càlida (refredament) | Remarcable | Molt humit | - | | |
| Període Romà inicial (123 BCE-200 CE) | Molt càlida (escalfament) | Intensa | Molt humit | - | NAO-/EA+ | Influència feble |
| Període Romà tardà (200-470 CE) | Càlida (refredament) | Intensa | Més sec | + | | |
| Alta Edat Mitjana inicial (470-700 CE) | Càlida (refredament) (disminució) | Intensa | Humit | - | NAO+/EA- | Començament influència |
| Alta Edat Mitjana tardana (700-900 CE) | Freda (refredament) (disminució) | Intensa | Més sec | + | | |
| Anomalia Climàtica Medieval (900-1275 CE) | Càlida | Molt feble | Molt sec | + | NAO+/EA+ | EA/WR+ |
| Petita Edat de Gel (a) (1275-1540 CE) | Càlida | Intensa | Humit | - | | EA/WR- |
| Petita Edat de Gel (b) (1540-1850 CE) | Freda (refredament) | Feble | Molt humit | - | NAO-/EA- | EA/WR+ |

Taula 4.1. Compilació de les condicions climàtiques a la regió central de la Mediterrània occidental (Cisneros et al., 2016; Cisneros et al., 2019; Cisneros et al., *in prep.*) i configuracions dels patrons atmosfèrics i teleconnexions durant cada període dels últims 2.700 anys (Roberts et al., 2012; Sánchez-López et al., 2016). NAO: North Atlantic Oscillation; EA: East Atlantic pattern; WR: West Russian pattern.

l'EA/WR o l'SCAN van poder jugar un paper important.

El patró SCAN és associat amb pressions anòmalament baixes sobre la Mediterrània i la seva influència en aquesta regió roman encara per ser millor determinada. Fases d'SCAN positives són relacionades amb condicions més humides per l'Europa central i meridional (Bueh and Nakamura, 2007; Josey et al., 2011). Així, per exemple durant la MCA (LIAb) condicions seques (humides i fredes) a l'àrea d'estudi d'aquesta tesi i a l'Europa central suggereixen la possible influència d'SCAN- (SCAN+). Per contra, durant el RP tardà (primera meitat de l'EMA) s'esperaria la influència d'SCAN- (SCAN+), donades les condicions seques (humides) a la Mediterrània occidental, però les condicions fredes i humides (seques) de l'Europa central suggeririen SCAN+ (SCAN-). Aquestes discrepàncies durant el RP tardà i la primera part de l'EMA podrien estar relacionades amb signes oposats en la parella NAO/EA. Però cal dir que no s'han observat discrepàncies durant el RP inicial o el final de l'EMA, quan també signes oposats en la parella NAO/EA van ocórrer. Per tant, possiblement durant el RP tardà o la primera part de l'EMA, una variabilitat climàtica més complexa i/o una variabilitat de més alta freqüència va tenir lloc. Tenint en compte la variabilitat de les condicions climàtiques descrites amb les reconstruccions elaborades durant la present tesi pels darrers 2.700 anys i la dels patrons atmosfèrics, s'han elaborat set combinacions diferents al llarg del temps (Fig. 4.6). Cadascuna d'aquestes combinacions, a part de l'evolució de les SST i la DWF derivades dels sediments marins i l'evolució hidroclimàtica derivada de les estalagmites, ha tingut en compte reconstruccions d'estudis previs, com són la TSI o la NAO, així com també observacions d'altres treballs com aquelles referents a la parella NAO/EA i EA/WR (Fig. 4.6).

Figura 4.6 (a la següent pàgina). Perfil topogràfic/batimètric des de Mallorca a Marsella (França) mostrant les 7 combinacions diferents de les condicions climàtiques a la regió central de la Mediterrània occidental i les configuracions dels patrons atmosfèrics. **a)** Mapa de situació amb les coordenades del perfil i les localitzacions dels sediments marins i de les coves efecte d'estudi de la present tesi. L'àrea ombrejada indica la regió on la formació d'aigua fonda (DWF) succeeix. **b-h)** La compilació dels registres de la Mediterrània centre-occidental inclou: la variabilitat hidrològica (Cisneros et al., in *prep.*); Temperatures superficials de l'aigua (SST; Cisneros et al., 2016); DWF (cel·la i fletxa porpra; Cisneros et al., 2019). La compilació dels factors de forçament i dels patrons atmosfèrics inclou: la Irradiació Solar Total (TSI; Steinhilber et al., 2009; 2012); l'Oscil·lació de l'Atlàntic Nord (NAO; Faust et al., 2016) i vents de l'oest (fletxes verdes); North Atlantic Oscillation/ East Atlantic pattern (NAO/EA; Sánchez-López et al., 2016); East Atlantic/West Russian (EA/WR) pattern (Josey et al., 2011; Roberts et al., 2012).

