

TENDÈNCIES CLIMÀTIQUES A LES ILLES BALEARS

Climent Ramis, Víctor Homar, Romualdo Romero i Sergio Alonso

Grup de Meteorologia. Departament de Física. Universitat de les Illes Balears. Palma de Mallorca
(e-mail: cramis@uib.es)

Resum

En aquest treball es presenten les tendències en la precipitació a les Illes Balears deduïdes de les sèries diàries de precipitació a 21 estacions pluviomètriques durant 50 anys (1951-2000). Els resultats indiquen una tendència a la disminució de la precipitació anual, com també en cada una de les estacions climàtiques. S'observa un augment de la contribució a la precipitació anual de les precipitacions diàries dèbils i moderades (0-16 mm) i de les torrencials (>64 mm), i disminueix la contribució de les precipitacions fortes (16-64 mm). S'estudia la tendència de les temperatures deduïda de les sèries diàries de temperatures màximes i mínimes a 4 estacions termomètriques durant 25 anys (1976-2000). Els resultats indiquen un augment en cada una de les temperatures considerades. Una anàlisi de la tendència de la temperatura a l'atmosfera lliure (1.500, 5.500 i 14.000 m) realitzada en dades de 20 anys de l'estació de radiosondatges de Palma (1981-2000) mostra un augment de les temperatures a 1.500 i 5.500 m, i una disminució a 14.000 m. Els resultats del model HadCM2 del Centre Hadley per al segle XXI al voltant de les Illes Balears indiquen un augment de les temperatures mitjanes anuals de l'ordre de 3 °C a final de segle, que la precipitació total anual no sofreix cap canvi significatiu però que les precipitacions estacionals sofreixen modificacions. Mentre que a la tardor es preveu una disminució de la quantitat de pluja, a l'hivern se n'indica un augment lleuger.

Abstract

In this work we present the observed tendencies of the precipitation at the Balearic Islands deduced from the daily data at 21 rain gauge stations during 50 years (1951-2000). The results indicate a negative tendency in the annual total precipitation as well as during each climatic seasons. Also we find a positive tendency of the contribution to the annual precipitation from weak and moderate (0-16 mm) and torrential daily rainfalls (>64 mm) but a negative tendency from the notable precipitation (16-64 mm). An analysis of the temperature tendency from the daily series of maximum and minimum temperatures at 4 stations for 25 years (1976-2000) is carried out. The results show a positive tendency of both maximum and minimum temperatures. A similar study is made for the free atmosphere temperatures at 1500, 5500 and 14000 m for a period of 20 years (1981-2000) over Palma. We find that the temperature is increasing in the troposphere at 1500 and 5500 m and decreasing in the stratosphere at 14000 m. An analysis of the HadCM2 model results for the XXI century at the Balearic Islands area indicates that temperatures will increase about 3 °C by the end of the century, annual precipitation will not suffer substantial modifications but that seasonal precipitation will change, the autumn will be dryer and the winter wetter.

1. Introducció

L'augment notable de la concentració de gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera; especialment de diòxid de carboni, metà i òxids de nitrògen; observat durant el segle XX, (figura 1), està íntimament lligat al desenvolupament tecnològic que ha tingut lloc i al consum massiu de combustibles fòssils, especialment petroli, per obtenir l'energia que aquest desenvolupament ha necessitat. Aquest augment dels gasos d'efecte hivernacle durant els darrers cent anys és, per tant, produït per actuacions antropogèniques i mai a la història de la Terra no s'havia produït un augment tan gran en tan poc temps. El creixement conseqüent de l'efecte hivernacle ha tingut com a resposta un augment de la temperatura de l'aire al nivell de la superfície de la Terra, com també de l'aigua de la superfície de la mar (figura 2). És ben evident l'augment produït durant els últims cinquanta anys i en una proporció molt més elevada durant els darrers vint-i-cinc. Aquest és segurament el senyal més conegut i important del reforçat efecte hivernacle, però hi ha també altres senyals tal volta menys clars per la seva naturalesa, com per exemple la redistribució planetària de la precipitació o la freqüència i intensitat del fenomen de *El Niño*,

que indiquen la realitat d'un canvi climàtic que es produeix a una velocitat ràpida, encara que no mesurable (IPCC, 2001).

Els augments de la temperatura de l'aire al nivell de la superfície té, d'altra banda, repercussions en la distribució de la temperatura a tota l'atmosfera per mantenir el balanç energètic global del sistema terra-atmosfera. En particular, si les capes baixes atmosfèriques s'encalenteixen, les capes superiors s'han de refredar. Aquesta deducció de caire teòric està confirmada observacionalment, la qual cosa és un senyal més de les modificacions que es produeixen a l'atmosfera i que han de tenir alguna conseqüència sobre el clima.

Els models numèrics que simulen el clima són l'únic instrument disponible en aquests moments per analitzar el que pot succeir en un futur més o manco pròxim. Malgrat les seves imperfeccions actuals causades pels coneixements parcials sobre els processos físics i químics, per tant transformables en equacions matemàtiques, que relacionen els diferents subsistemes del sistema climàtic (atmosfera, hidrosfera, litosfera, criosfera, biosfera), i fins i tot dels que es produeixen dins d'un únic subsistema, els models climàtics són suficientment complets per tenir-ne en compte els seus pronòstics amb els diferents escenaris socioeconòmics considerats. És conegut que els models indiquen, pràcticament per a tots els escenaris, un augment global de la temperatura de l'aire al nivell de la superfície per a finals del segle XXI entre 3 i 6 °C, modificacions en el règim pluviomètric i modificacions en la cobertura de gel en els pols (IPCC, 2001). Aquestes modificacions no són les mateixes a tots els punts de la terra, unes regions sofriran augment i altres disminució de precipitació, i els augments de temperatura a les zones polars seran més importants que a les zones equatorials.

És interessant des d'aquest punt de vista, doncs, analitzar el que es produeix climàticament parlant a les Illes Balears. En primer lloc, si el senyal termomètric observat a nivell global també succeeix a les Illes Balears i quin és el valor d'aquest senyal, si és que existeix. Per extensió, també com està afectant el canvi climàtic recent en la precipitació, si és que l'afecta. Per últim, és interessant determinar què es pot deduir d'alguns resultats de model climàtics quan estudiam amb cura els valors que s'obtenen per a les Illes Balears. Aquest és l'objectiu del present treball

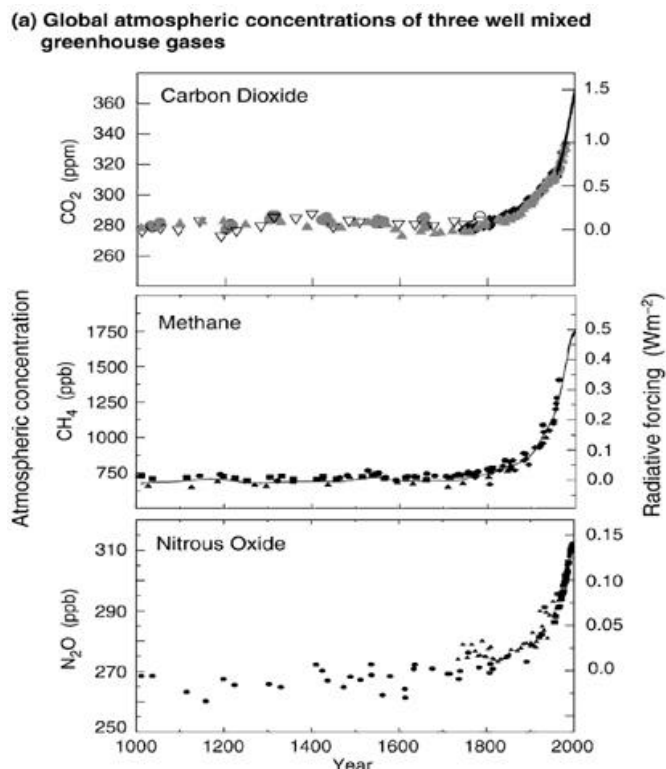


Fig. 1. Evolució de la concentració d'alguns gasos d'efecte hivernacle durant els últims 1000 anys. Es pot observar el creixement exponencial durant el segle XX

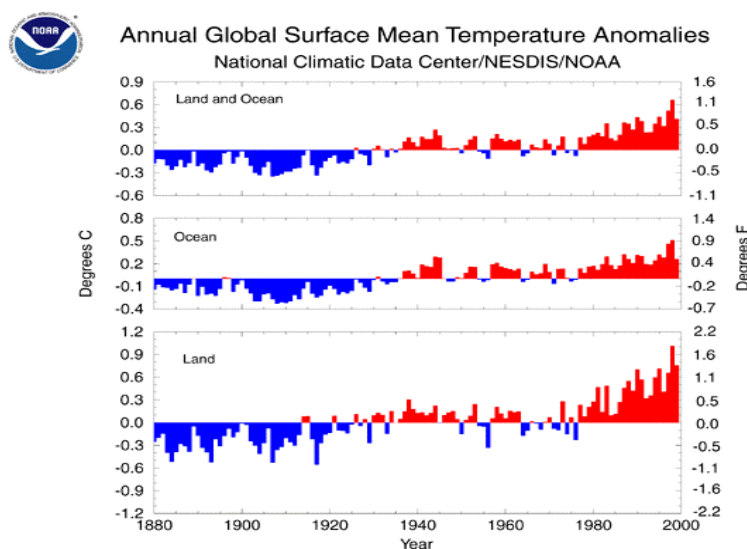


Fig. 2. Evolució de la temperatura superficial global mitjana des de 1880 a 2000. És ben notable l'augment observat durant els últims 20 anys

2. Estudi de les tendències climàtiques a les Illes Balears amb dades instrumentals

2.1. Precipitació

És convenient, abans d'estudiar les possibles tendències, posar un punt de partida per saber què representarien sobre aquest els previsible canvis. La figura 3 mostra la distribució espacial de la precipitació mitjana anual a les Illes Balears obtinguda per Guijarro (1986), a partir de dades de 30 anys a un nombre important d'observatoris pluviomètrics i amb l'ús de tècniques d'interpolació en les quals hi va incloure paràmetres no convencionals a les interpolacions espacials, com l'altura de l'estació, la distància a la mar, etc.

Es pot veure que, malgrat l'estructura fina que mostra la figura, hi ha unes característiques de més gran escala que permeten donar una descripció ben clara de la precipitació anual a les Illes Balears des del punt de vista climàtic. A Mallorca, el màxim de precipitació (superior als 1400 mm) es troba a la zona de la serra de Tramuntana on hi ha les muntanyes més altes. Tota la serra rep les majors quantitats de precipitació. Quantitats semblants a les rebudes per la part oest de la serra també són les que es recullen al nord-est de l'illa. Les menors quantitats de precipitació són les que reben les terres del sud, amb una faixa costanera que a penes assoleix els 300 mm. El gradient de pluviometria és en direcció i sentit sud-nord, molt pronunciat a les costes del sud i a la falda de la serra de Tramuntana. A Menorca la distribució de la precipitació mitjana anual és molt simple. Les majors quantitats, que a alguns punts assoleixen els 700 mm, es donen al centre de l'illa. La precipitació disminueix progressivament cap a les costes. Les diferències no són tan notables com a Mallorca, possiblement perquè la orografia de Menorca és molt més simple. Eivissa és l'illa que rep menys precipitació. A la part nord de l'illa alguns punts assoleixen els 600 mm i és especialment seca a la part costanera de l'oest i del sud. El mateix succeeix a Formentera, que rep unes quantitats de precipitació semblants a les del sud d'Eivissa.

Una anàlisi de les tendències climàtiques, en particular de la precipitació, no es pot dur a terme amb una resolució espacial com la indicada anteriorment. Per aquest motiu s'ha fet una anàlisi global de la següent manera:

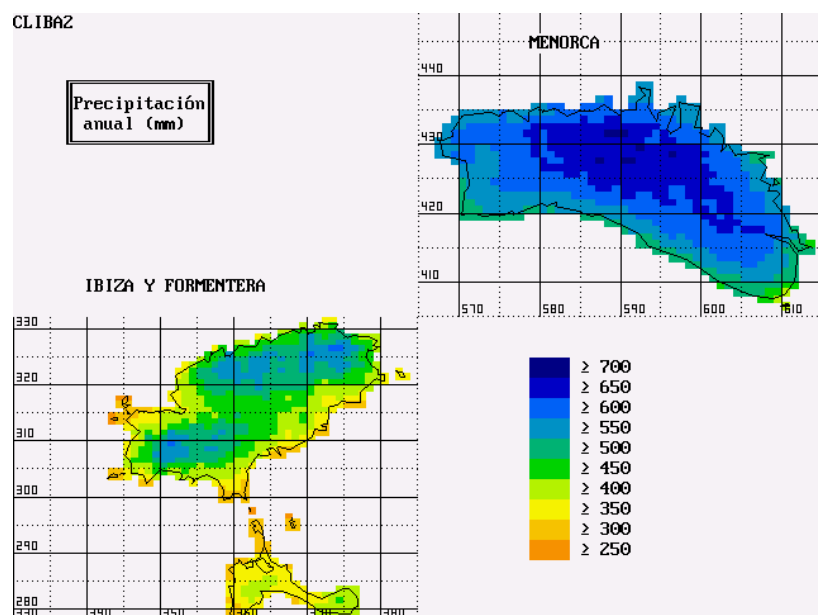
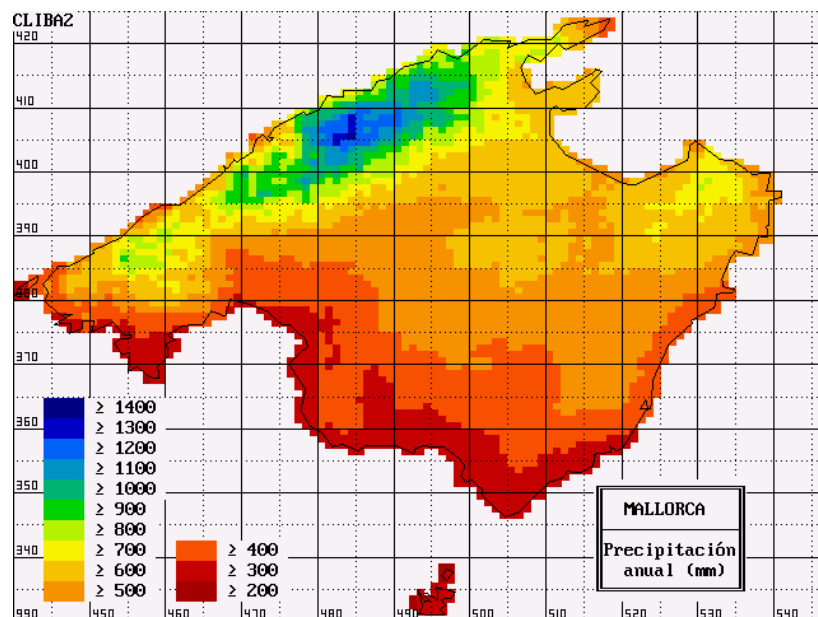


Fig. 3. Precipitacions mitjanes anuals a les Illes Balears. (Guijarro, 1986)

S'han obtingut del Centre Meteorològic Territorial en Illes Balears de l'Institut Nacional de Meteorologia, les dades de precipitació diària del nombre màxim d'estacions pluviomètriques de les Illes Balears que la seva sèrie inclou el període 1951-2000.

Malgrat que el nombre real d'estacions pluviomètriques és molt alt en relació amb l'extensió de les Illes, més de 180 estacions, n'hi ha poques que compleixin la condició de tenir la sèrie completa durant el període indicat. Després de filtrar les dades s'ha obtingut que el nombre de

estacions disponibles per fer l'estudi es redueix a 21, les quals estan indicades a la figura 4. La referència completa de les estacions es pot veure a la taula 1.

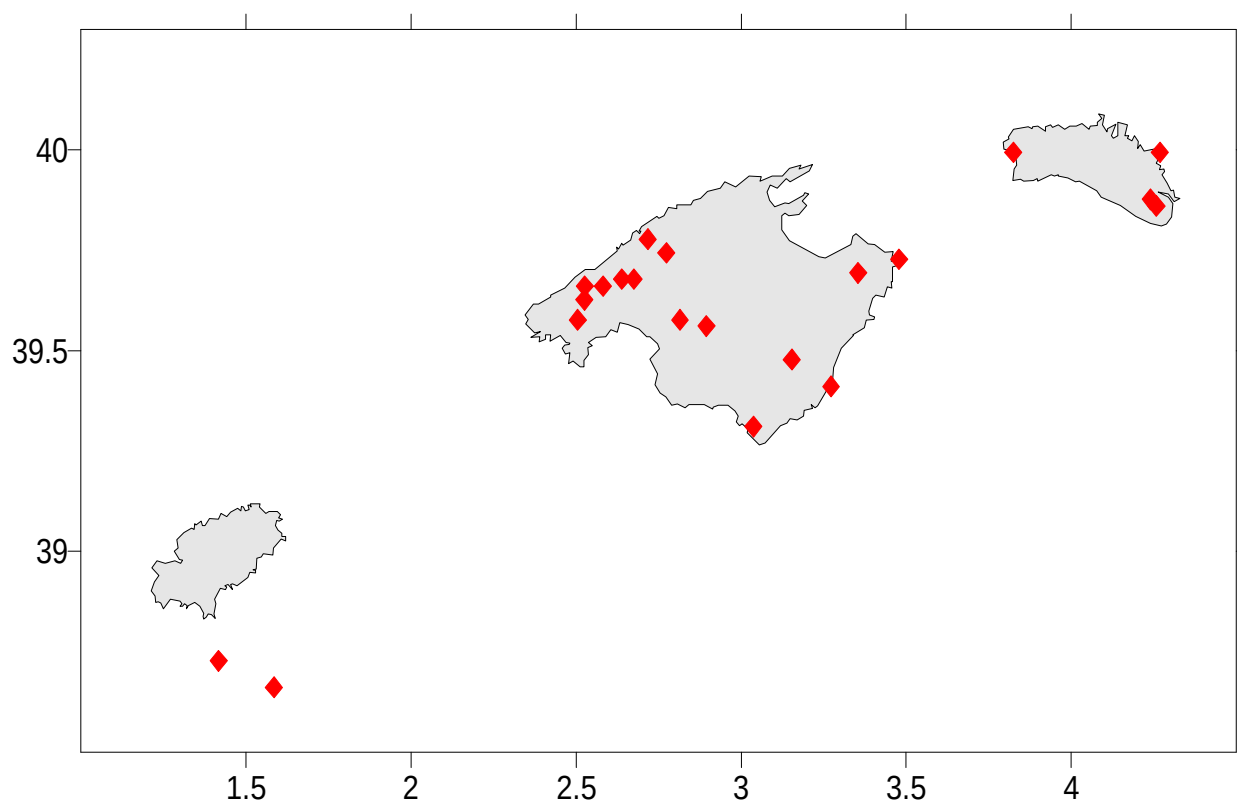


Fig. 4. Localització de les estacions pluviomètriques que tenen la sèrie diària completa en el període 1951-2000

Longitud (°)	Latitud (°)	altura (m)	estació pluviomètrica
2.717	39.778	40	B061 SÓLLER
2.505	39.577	145	B178 CALVIÀ
2.526	39.661	535	B217 LA CAMPANETA
2.525	39.627	265	B220 SON NÉT
2.582	39.661	180	B240 ESPORLES
2.639	39.678	190	B244 SON PACS
2.675	39.678	155	B260 BUNYOLA RAIXA
2.815	39.577	62	B282 XORRIGO
3.037	39.311	10	B379 SES SALINES SA VALL
3.272	39.411	17	B434 FAR DE PORTO COLOM
3.354	39.694	115	B520 ARTÀ
3.478	39.728	70	B569 FAR DE CAPDEPERA
3.154	39.478	115	B606 FELANITX
2.774	39.744	480	B648 ORIENT (SON BERNADES)
2.895	39.561	194	B670 ALGAIDA I (FARMÀCIA)
4.258	39.861	60	B801 SANT LLUÍS
4.24	39.877	50	B802 MAÓ LLUCMASSANES
4.268	39.994	12	B818 MAÓ FAR DE FAVARITX
3.824	39.994	9	B851 CIUTADELLA F. PORT
1.418	38.727	1	B982 LA SAVINA
1.585	38.661	109	B999 FAR DE FORMENTERA

Taula 1. Estacions pluviomètriques indicades a la figura 4

S'han separat, per a cada any i per a cada estació pluviomètrica, les precipitacions diàries en diferents categories (0-1(trança), 1-4 (a), 4-16 (b), 16-32 (c1), 32-64 (c2), 64-128 (d1), >128 (d2) mm). Per a cada una de les categories s'han considerat dues variables: el percentatge de precipitació respecte a la precipitació total anual i el nombre de dies anuals. S'han calculat les mitjanes dels valors obtinguts per eliminar les particularitats pròpies de cada estació pluviomètrica. A més, s'ha determinat la tendència de cada categoria per a cada una de les dues variables considerades, mitjançant l'ajust d'una recta a les sèries obtingudes.

Quant al percentatge de precipitació respecte a la precipitació total anual, el resultat es pot veure a les figures 5 i 6.

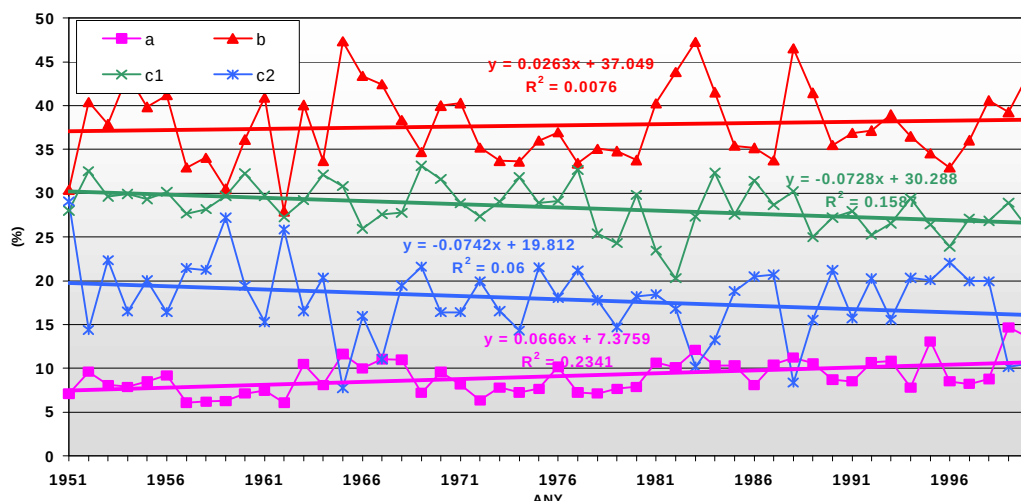


Fig. 5. Percentatge de precipitació respecte de la precipitació total anual corresponent a les categories a, b, c1 i c2

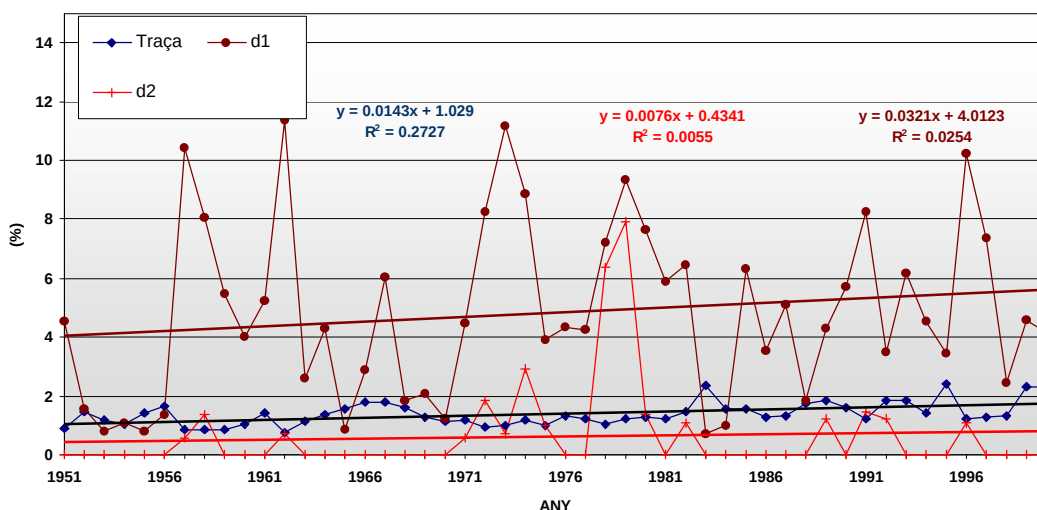


Fig. 6. Percentatge de precipitació respecte de la precipitació total anual corresponent a les categories traça, d1 i d2

Es pot veure que les precipitacions inapreciables (categoria traça) representen entre un 1 i un 2% de les precipitacions totals anuals, però que aquestes precipitacions tenen una tendència a augmentar la seva contribució anual; que les precipitacions febles (categoria a) representen entre un 7 i un 10% de les precipitacions anuals i tenen tendència a augmentar la contribució; que les pluges moderades (categoria b) representen entre el 30 i el 40% i també tenen tendència a augmentar lleugerament; que les pluges fortes (categories c1 i c2) representen del 25 al 30% i el 20 al 25% respectivament i que ambdues tenen tendència a disminuir la seva contribució. Finalment, les pluges torrencials (categories d1 i d2) presenten una gran

variabilitat: alguns anys poden arribar al 10% de la precipitació total, i la tendència és a augmentar la contribució.

En general, les tendències (deduïdes de la rectes ajustades) de totes les categories són febles i les variabilitats són grans, de tal manera que els corresponents coeficients de determinació (R^2 a les gràfiques) són petits, la qual cosa vol dir que la variabilitat explicada per la recta ajustada és petita.

S'ha aplicat el test *t* de *Student* (Harned and Soni, 1991) per a determinar el nivell de significància estadística de les tendències obtingudes. El resultat es mostra a la taula 2. Els ajusts amb un nivell de significància estadística inferior al 95% no es poden considerar significatius, no hi ha seguretat estadística del signe del pendent. A la taula 2 també s'hi inclouen els intervals per als pendents al 95% de significància estadística per a les categories en les quals la significància de l'ajust és igual o superior al 95%.

Categoria	Pendent (%/100 anys)	Nivell de significància estadística del pendent (%)	Interval del pendent al 95% de significància estadística
traça	1,43	99,99	0,75 - 2,11
a	6,66	99,96	3,16 – 10,16
b	2,63	45,28	---
c1	-7,28	99,57	-12,16 - -2,40
c2	-7,42	91,36	---
d1	3,21	73,11	---
d2	0,76	39,12	---

Taula 2. Pendent, nivell de significància i interval del pendent al 95% de significància estadística per al percentatge de precipitació anual

Quant als dies anuals de precipitació de cada categoria, els resultats es presenten a les figures 7 i 8.

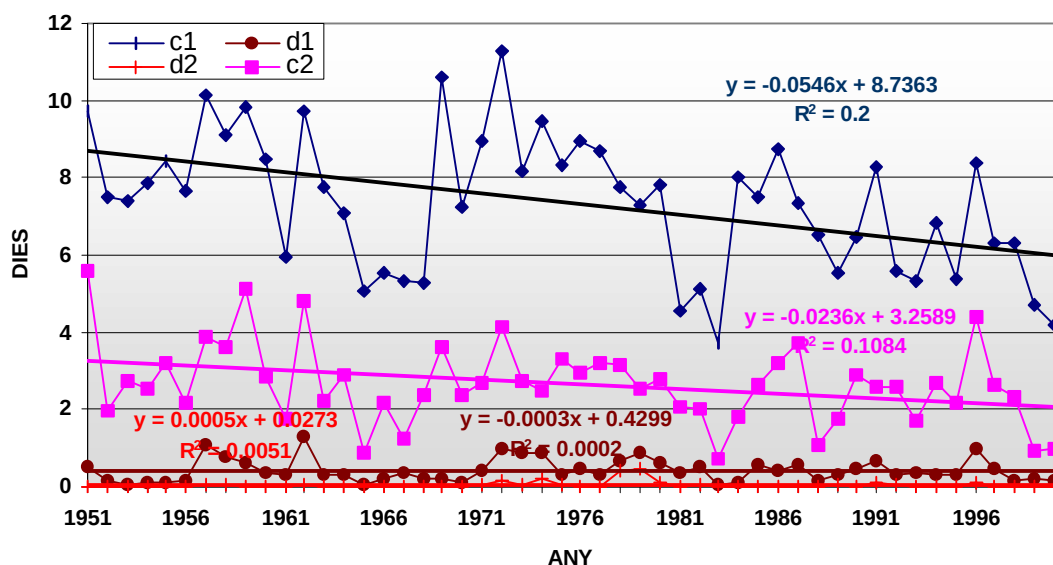


Fig. 7. Nombre anual de dies de precipitació corresponents a les categories c1, c2, d1 i d2

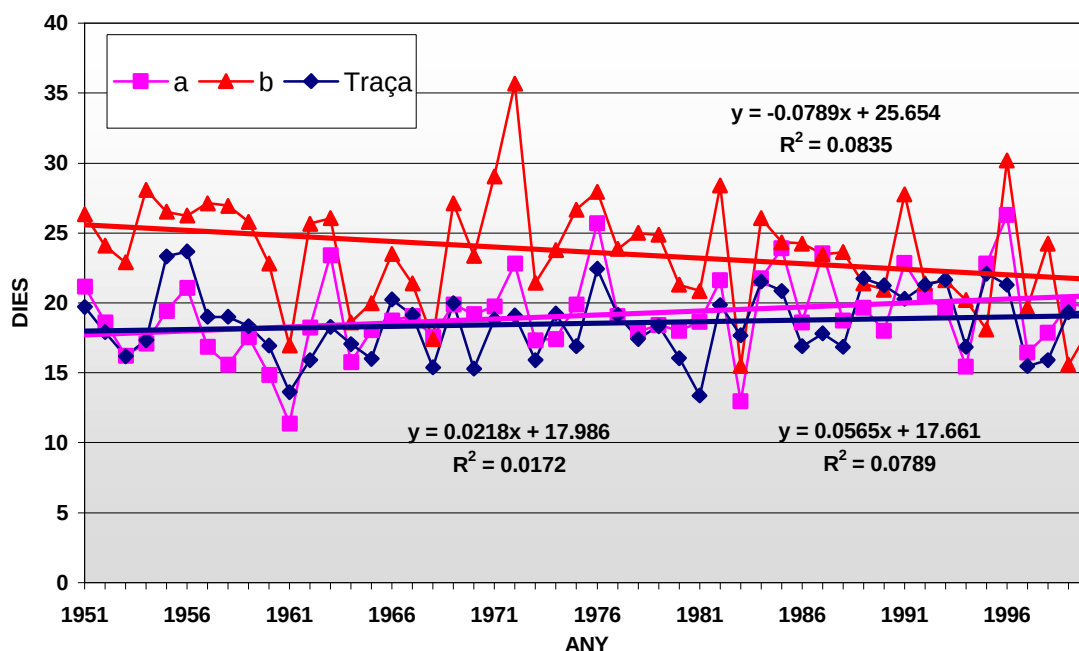


Fig. 8. Nombre anual de dies de precipitació corresponents a les categories traça, a i b

Es pot veure que el nombre de dies anuals de precipitacions inapreciables (categoria traça) varia entre els 13 i 24 i que tenen tendència a augmentar lleugerament. El mateix es pot dir per a la categoria a, però el nombre de dies oscil·la entre els 12 i els 27 anuals. El nombre de dies corresponents a pluges moderades (categoria b) varia entre els 16 i els 36 anuals amb una tendència clara a la disminució. Pel que fa a les pluges fortes (categories c1 i c2), el nombre de dies anuals és inferior a les categories anteriors amb una clara tendència a la disminució. Els dies de pluja torrencial (categories d1 i d2) amb dificultat supera un dia a l'any de mitjana entre les 21 estacions considerades. La seva tendència és pràcticament nul·la. La variabilitat interanual és alta i la part explicada per la recta ajustada no és molt gran.

El nivell de significància obtingut amb el test *t* de *Student* per al nombre anual de dies de precipitació es pot veure a la taula 3.

Categoria	Pendent (dies/100 anys)	Nivell de significància estadística del pendent (%)	Interval del pendent al 95% de significància estadística
traça	2,18	63,60	---
a	5,65	95,18	0,05 – 11,25
b	-7,89	95,82	-15,48 - -0,30
c1	-5,46	99,89	-8,63 - -2,30
c2	-2,36	98,04	-4,32 - -0,40
d1	0,05	37,79	---
d2	-0,03	7,77	---

Taula 3. Pendent, nivell de significància i interval del pendent al 95% de significància estadística per al nombre anual de dies de precipitació

També, per a cada una de les estacions considerades, s'ha determinat la precipitació anual i després se n'ha calculat la mitjana per a representar la precipitació mitjana de les Illes Balears. El resultat obtingut es pot veure a la figura 9. La gràfica mostra clarament una tendència negativa de la precipitació anual (280 mm en 100 anys). La variabilitat és molt gran (malgrat ésser valors mitjans), de tal manera que la recta ajustada sols dóna una explicació del 9% de la variabilitat observada. A falta d'una anàlisi harmònica, sembla que hi ha una periodicitat marcada en els 50 anys considerats, la qual tendria un període d'uns 22 anys. És remarcable la baixa precipitació dels anys 1965, 1983, 1999 i 2000, i la forta pluviositat dels anys 1951, 1962, 1972 i 1996.

Per eliminar part de l'elevada variabilitat s'ha aplicat un filtre passa-baixa (mitjana mòbil de 5 anys) a les dades de precipitació anual i també s'ha calculat la tendència de la nova sèrie obtinguda. El resultat es pot veure a la figura 10, on queda de manifest una marcada disminució de la precipitació (214 mm en 100 anys) amb una representativitat de la recta més gran que en les dades inicials.

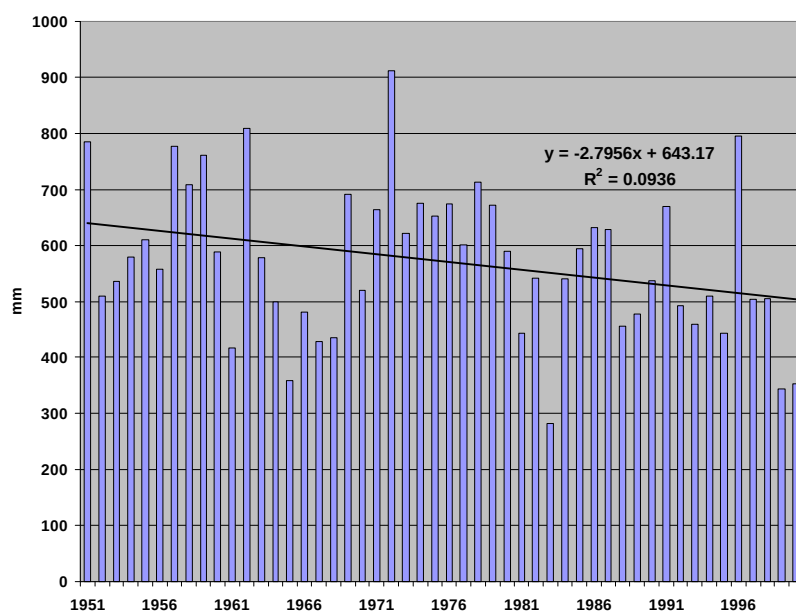


Fig. 9. Tendència de la precipitació mitjana anual

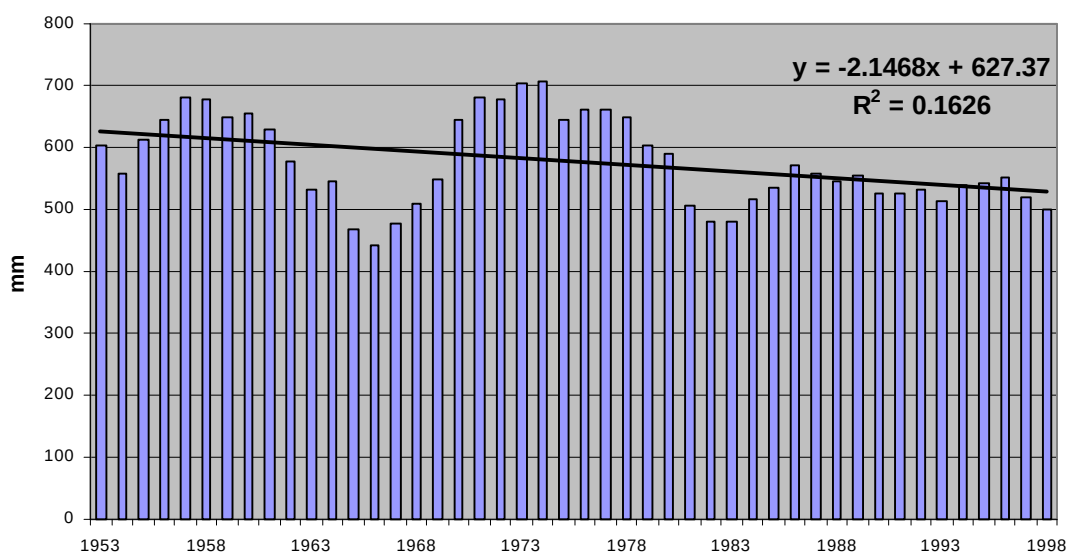


Fig. 10. Tendència de la precipitació mitjana anual. Mitjana mòbil de 5 anys

Encara per eliminar més la variabilitat, s'ha aplicat a la sèrie original un filtre de les mateixes característiques amb una amplada de 30 anys (per obtenir-ne valors normals). El resultat es mostra a la figura 11. La disminució de la precipitació és menys forta però encara molt significativa (186 mm en 100 anys), encara que el nombre de dades s'ha reduït fortament.

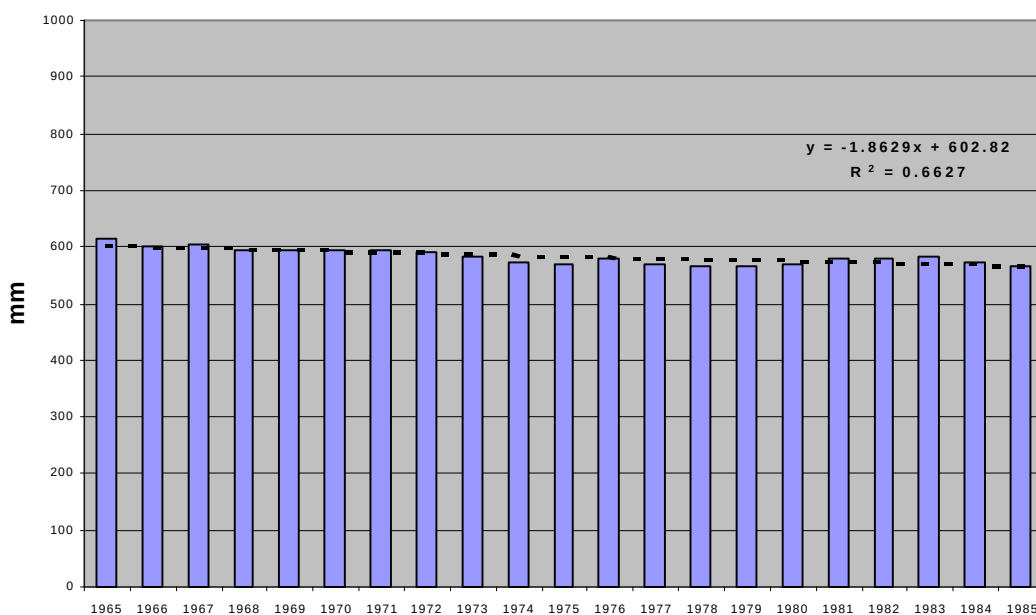


Fig. 11. Tendència de la precipitació mitjana anual. Mitjana mòbil de 30 anys

Considerant les quatre estacions climàtiques, on l'hivern ve representat pels mesos de desembre, gener i febrer; la primavera pels mesos de març, abril i maig; l'estiu per juny, juliol i agost; i la tardor per setembre, octubre i novembre, s'ha dut a terme un exercici semblant a l'anterior però focalitzat en les estacions. Els resultats es poden veure a les figures 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 i 19. Per a eliminar variacions interanuals, s'ha aplicat el filtre de la mitjana mòbil de 5 anys a cada una de les quatre sèries de dades.

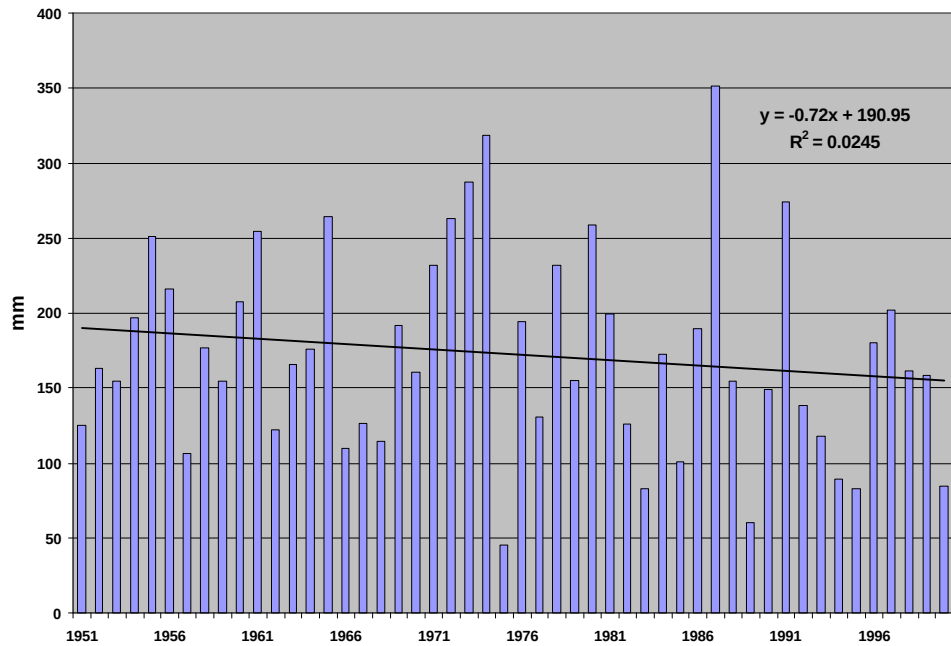


Fig. 12. Tendència de la precipitació mitjana durant l'hivern

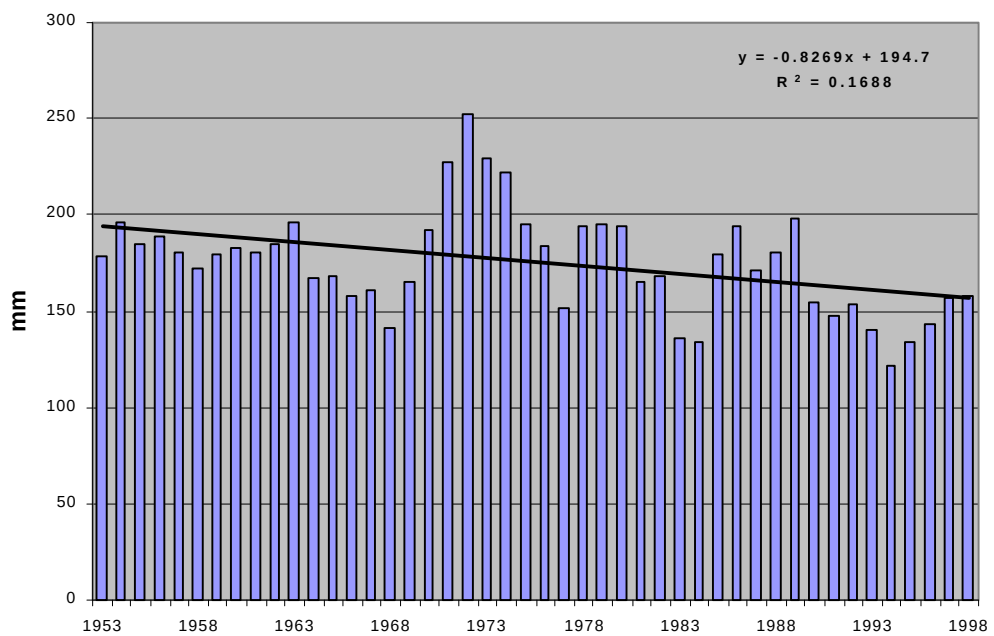


Fig. 13. Tendència de la precipitació mitjana durant l'hivern. Mitjana mòbil de 5 anys

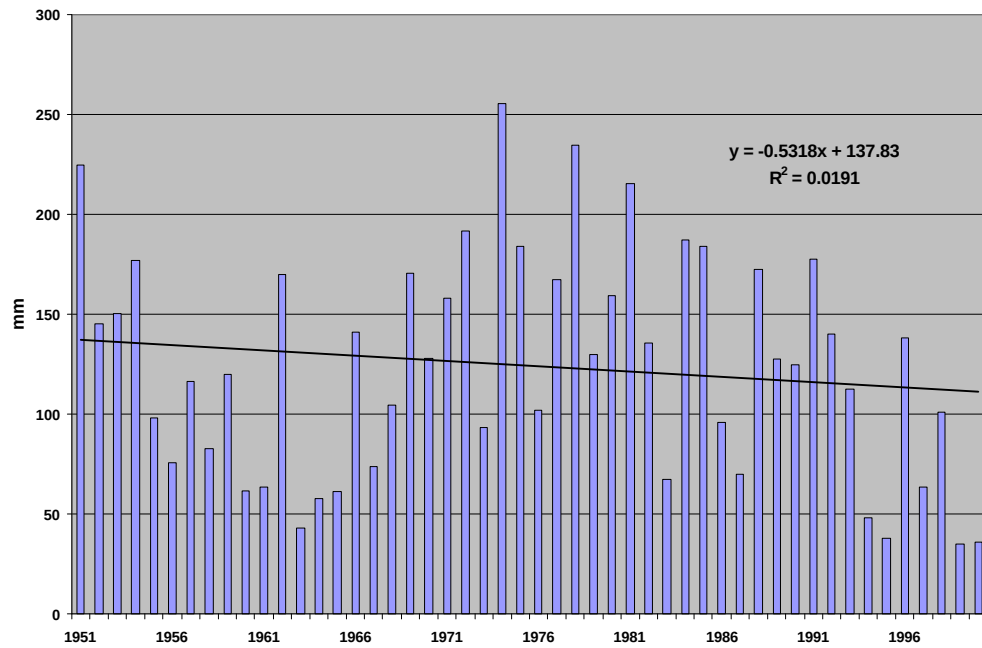


Fig. 14. Tendència de la precipitació mitjana durant la primavera

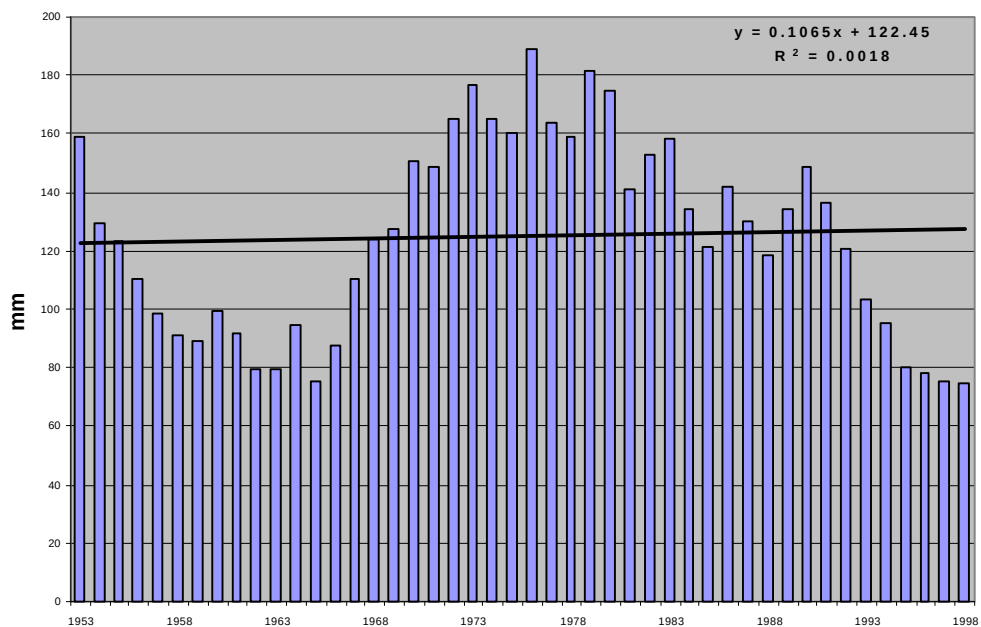


Fig. 15. Tendència de la precipitació mitjana durant la primavera. Mitjana mòbil de 5 anys

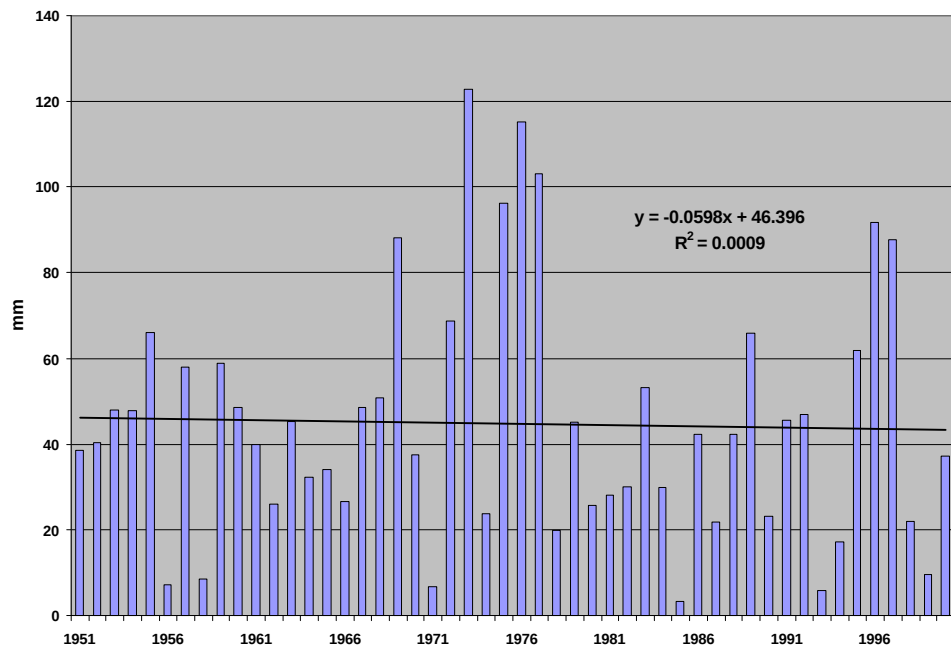


Fig. 16. Tendència de la precipitació mitjana durant l'estiu

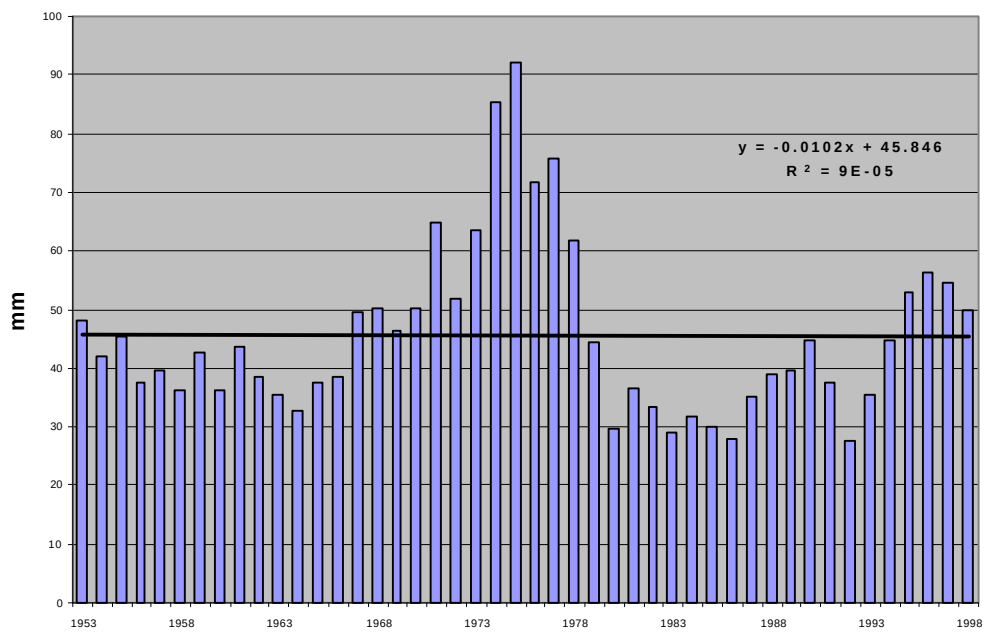


Fig. 17. Tendència de la precipitació mitjana durant l'estiu. Mitjana mòbil de 5 anys

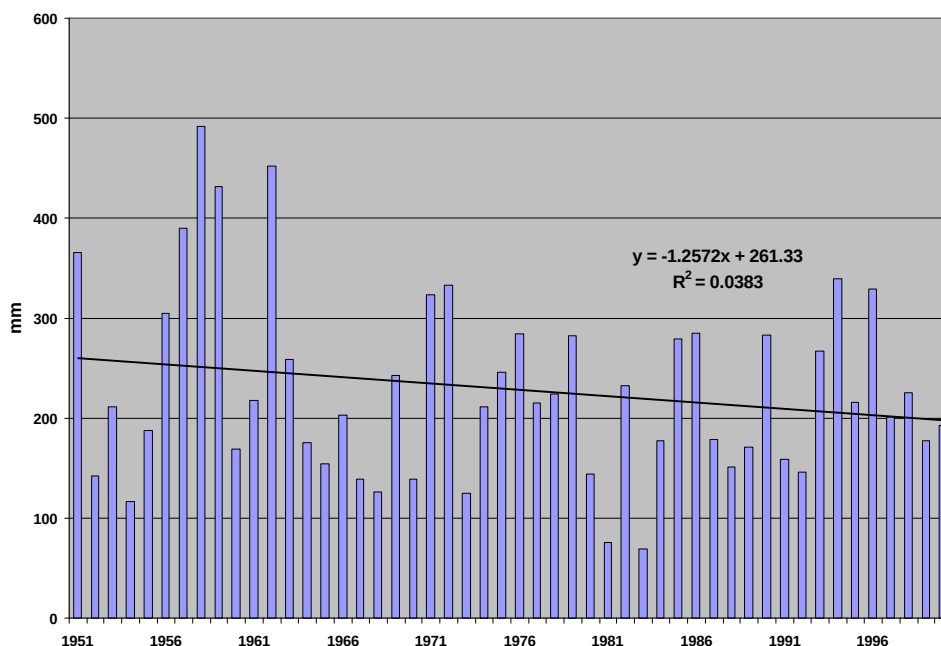


Fig. 18. Tendència de la precipitació mitjana durant la tardor

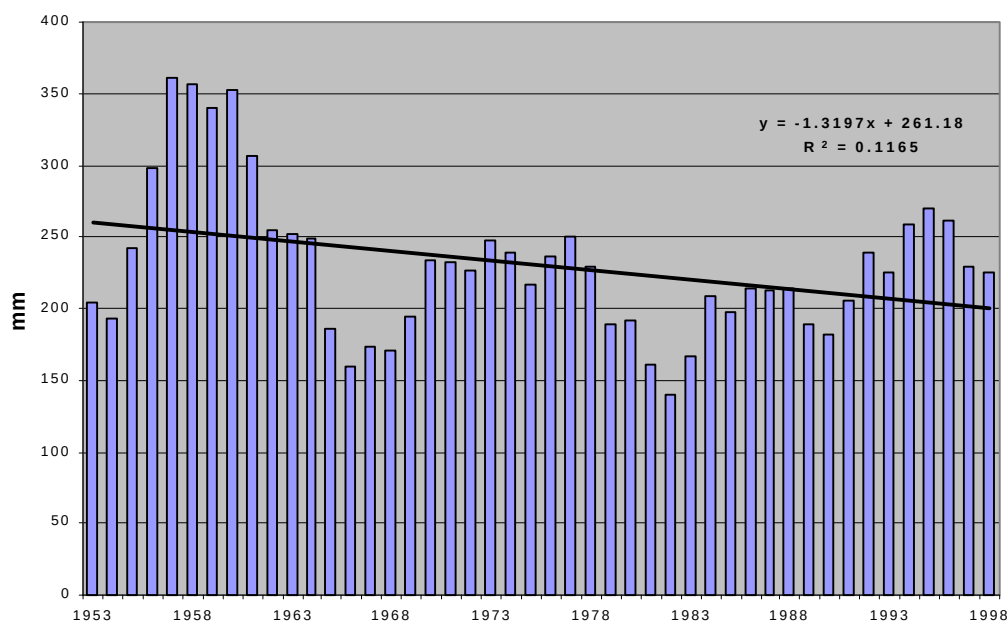


Fig. 19. Tendència de la precipitació mitjana durant la tardor. Mitjana mòbil de 5 anys

Els resultats mostren que la tendència és negativa en les quatre estacions (el valor absolut més petit correspon a l'estiu i el més gran a la tardor) per a les sèries originals, però igualment la variabilitat és molt gran i la representativitat de la recta és baixa (el coeficient de determinació és petit). La variabilitat més gran es presenta durant l'estiu i la més baixa durant la tardor. Les sèries filtrades mostren una tendència semblant a la de les sèries originals, si exceptuam la primavera, per a la qual la sèrie filtrada presenta una tendència lleugerament positiva.

El resultat d'aplicar el test *t* de *Student* a les anteriors sèries pluviomètriques es pot veure a la taula 4.

Variable	Pendent (mm/100 anys)	Nivell de significància estadística del pendent (%)	Interval del pendent al 95% de significància estadística
Precipitació mitjana anual	-279,56	96,93	-532,03 - -27,10
Precipitació mitjana anual, mitjana mòbil 5 anys	-214,68	99,45	-362,70 - -66,70
Precipitació mitjana anual, mitjana mòbil 30 anys	-186,29	99,99	-250,11 - -122,50
Precipitació mitjana hivern	-72,00	72,23	---
Precipitació mitjana hivern, mitjana mòbil 5 anys	-82,69	99,54	-138,44 - -26,90
Precipitació mitjana primavera	-53,18	66,15	---
Precipitació mitjana primavera, mitjana mòbil 5 anys	10,65	22,05	---
Precipitació mitjana estiu	-5,98	16,38	---
Precipitació mitjana estiu, mitjana mòbil 5 anys	-1,02	4,99	---
Precipitació mitjana tardor	-125,72	82,68	---
Precipitació mitjana tardor, mitjana mòbil 5 anys	-131,97	97,97	-242,39 - -21,6

Taula 4. Pendent, nivell de significància i interval del pendent al 95% de significància estadística per a la precipitació anual i estacional.

Per a completar l'anàlisi de la precipitació s'ha calculat l'índex d'estacionalitat. Aquest índex (Walsh and Lawler, 1981) intenta, en un sol nombre, caracteritzar el règim pluviomètric d'una regió. Es defineix de la següent manera per a un any determinat :

$$SI = \frac{1}{R} \sum_{n=1}^{12} \left| Mi - \frac{R}{12} \right|$$

on *Mi* és la precipitació mensual i *R* és la precipitació anual. Els valors de l'índex indiquen el tipus de règim pluviomètric segons la taula 5:

Valor Index	Règim pluviomètric
<0.19	pluja distribuïda durant tot l'any
0.20-0.39	estació humida ben marcada
0.40-0.59	estació seca curta
0.60-0.79	Estacional
0.80-0.99	estació seca llarga
1.00-1.99	precipitació en menys de 3 mesos
>1.20	precipitació en 1-2 mesos

Taula 5. Índex d'estacionalitat i règim pluviomètric

Una anàlisi de l'índex d'estacionalitat a la zona mediterrània espanyola es pot veure a Sumner *et al.* (2001).

S'ha determinat l'índex d'estacionalitat per a les Illes Balears, calculant-lo per cada any dels 50 considerats per a cada una de les 21 estacions pluviomètriques i després se n'ha determinat la mitjana. A la sèrie de valors s'hi ha aplicat un filtre passa-baixa de la mitjana mòbil amb una finestra de 5 anys i la nova sèrie s'ha emprat per determinar-ne la tendència. El resultat es presenta a la figura 20, la qual mostra una disminució molt feble de l'estacionalitat. El nivell de significància estadística és del 98,84% i l'interval del pendent al 95% de significància de S_I és de $(-0,28 ; -0,004)$ cada 100 anys.

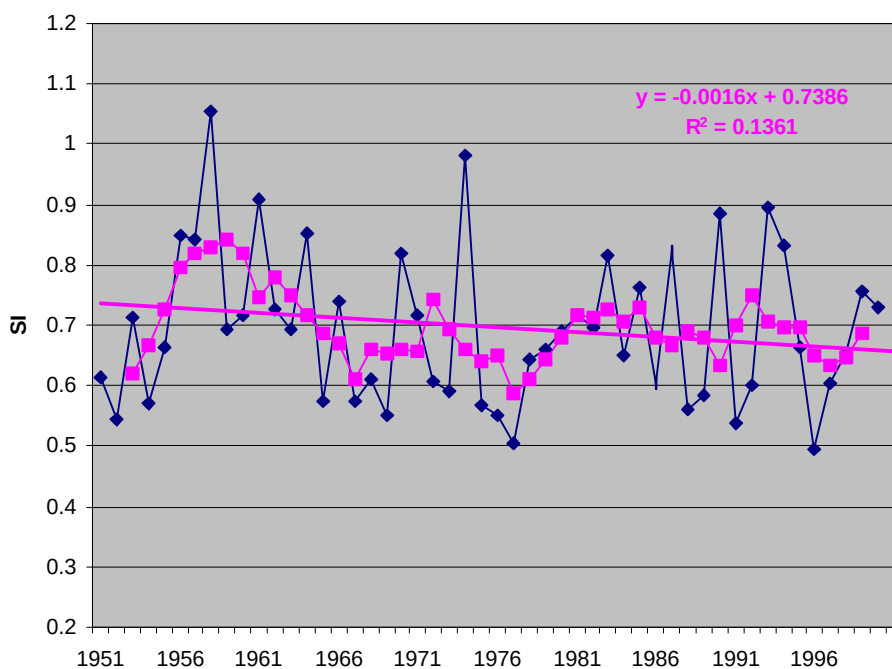


Fig. 20. Índex d'estacionalitat i mitjana mòbil de 5 anys amb la seva tendència

2.2. Temperatura

2.2.1. Temperatura superficial de l'aire

La distribució espacial de la temperatura mitjana anual sobre les Illes Balears (Guijarro, 1986) es pot veure a la Figura 21. A Mallorca, les temperatures menors es donen a la serra de Tramuntana mentre que les majors es localitzen a la falda de l'esmentada serra. Tota la part central de l'illa pràcticament gaudeix de la mateixa temperatura mitjana anual. Al sud hi ha una zona on les temperatures són un poc inferiors com a conseqüència de les menors temperatures mínimes que allà es donen.

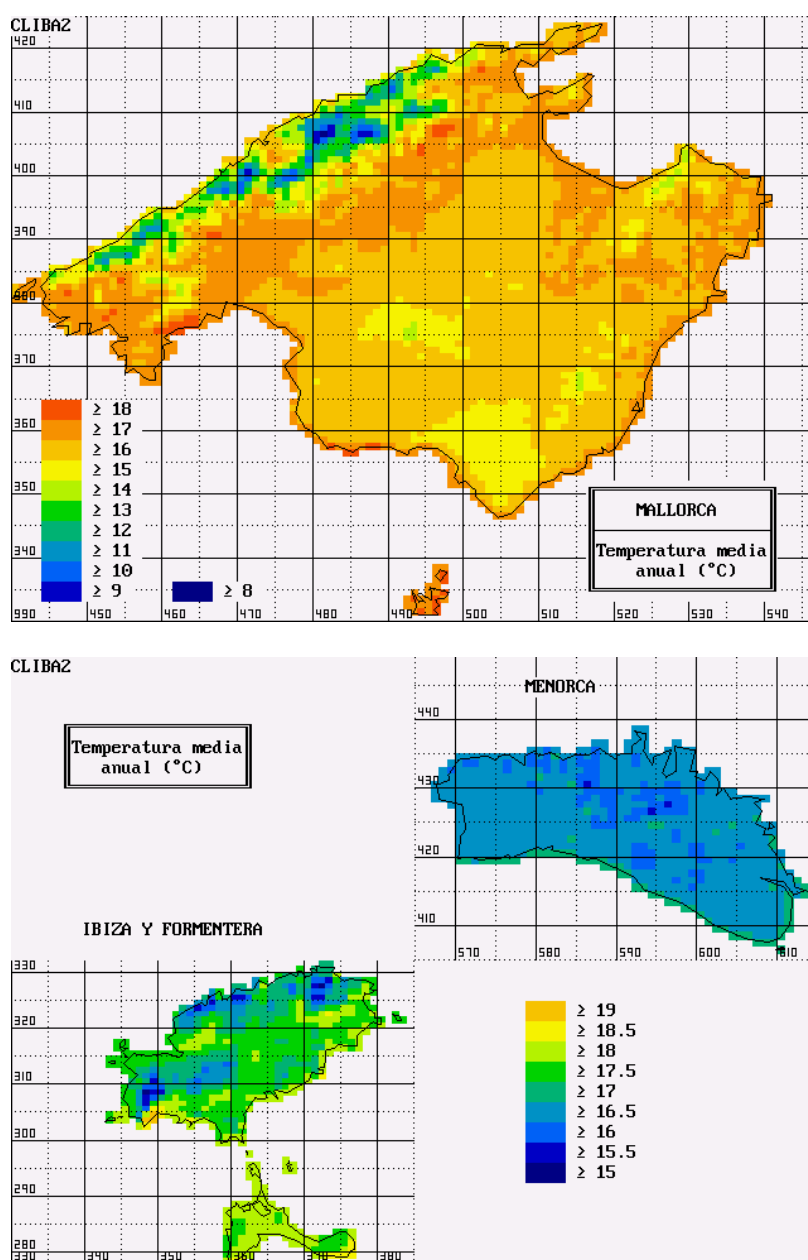


Fig. 21. Temperatures mitjanes anuals a les Illes Balears (Guijarro, 1986)

A Menorca, la uniformitat és pràcticament total, mentre que a Eivissa la part nord de l'illa presenta una temperatura mitjana anual un poc inferior a la part sud. Formentera presenta unes característiques semblants a les del sud d'Eivissa.

Per estudiar les tendències termomètriques a les Illes Balears s'ha seguit una metodologia semblant a l'emprada per a l'estudi de les precipitacions, és a dir, un estudi global sense cercar detalls locals.

S'han obtingut del Centre Meteorològic Territorial en Illes Balears, de l'Institut Nacional de Meteorologia, les dades de temperatura màxima i mínima diàries de totes les estacions termomètriques que han operat a les Illes Balears. El nombre d'estacions termomètriques és molt inferior al nombre d'estacions pluviomètriques i gran part d'aquestes tenen una sèrie molt curta. La situació de les estacions termomètriques es pot veure a la figura 22. La figura 23 mostra la llargària de les respectives sèries temporals i la taula 6 indica la referència completa de les estacions. Com es pot veure a la figura 23, la llargària de les sèries és molt heterogènia i molt poques estacions tenen les sèries coincidents i, si ho són, és durant un interval curt de temps.

Després d'analitzar les sèries de dades disponibles, amb l'exigència d'una llargària mínima de 25 anys i amb un màxim de faltes, s'han seleccionat 4 estacions termomètriques que aconsegueixen amb les condicions indicades: Sa Cabaneta, aeroport de Palma, aeroport de Menorca i aeroport d'Eivissa. El període considerat de 25 anys és 1976-2000, que és precisament quan les observacions mostren el major augment de la temperatura global de la Terra. Les sèries seleccionades s'han completat mitjançant una comparació de la respectiva sèrie amb totes les altres sèries disponibles en els dies que mancava la data.

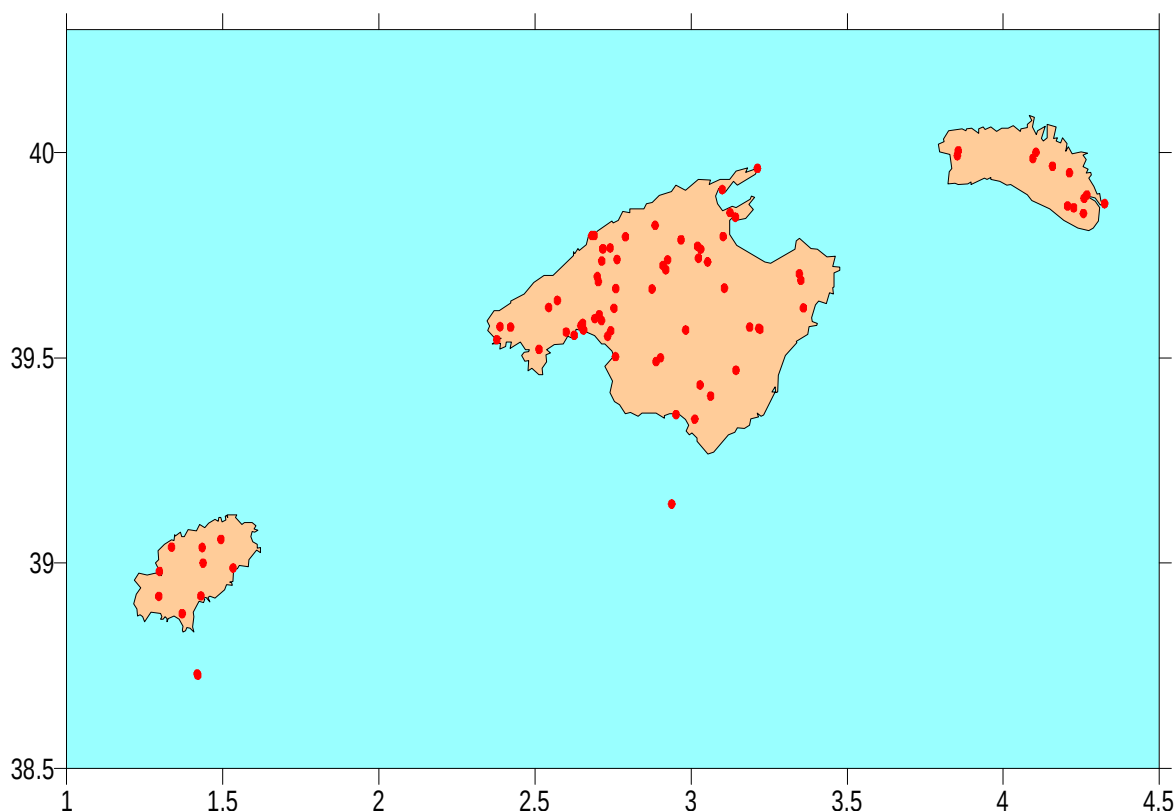


Fig. 22. Localització de les estacions termomètriques que han operat a les Illes Balears

Nombre d'ordre	Longitud(°)	Latitud(°)	Altura (m)	Estació termomètrica
1	2.654	39.569	19	228M Palma Monti-sion
2	3.360	39.623	75	494 Son Servera
3	2.647	39.578	20	228I Palma Institut
4	4.268	39.897	43	804B Maó Base Naval
5	2.657	39.569	17	228J Palma Prefectura
6	1.421	38.728	6	982A La Savina A. M.
7	2.886	39.824	490	013 Lluc
8	4.260	39.889	47	804C Maó Esplanada
9	2.379	39.545	10	108 Port d'Andratx
10	2.717	39.767	40	061 Soller
11	2.693	39.597	35	276 Pont d'Inca
12	4.207	39.870	80	890 Sant Climent
13	2.984	39.569	164	666 Montuiri
14	1.297	38.981	12	924 Sant Antoni Far Coves Blanques
15	3.013	39.351	3	373 Campos Salines de Llevant
16	2.706	39.606	50	275 Son Bonet Radiosondes
17	2.791	39.795	830	684 Escorca Son Torrella
18	1.336	39.039	180	919 Santa Agnès
19	3.213	39.963	150	001 Cap Formentor
20	2.733	39.553	2	278A Palma Aeroport 1
21	1.370	38.877	11	954 Aeroport d'Eivissa
22	3.101	39.911	2	780 Port de Pollença A. M.
23	2.919	39.716	105	678B Inca subestació
24	3.125	39.854	7	703 Alcúdia
25	2.902	39.501	162	331 Llucmajor subestació
26	3.856	40.006	27	856 Ciutadella subestació
27	3.189	39.575	77	614B Manacor subestació
28	4.095	39.986	63	825 Mercadal subestació
29	1.430	38.921	12	958 Eivissa C. Termica
30	2.704	39.687	210	256 Bunyola subestació
31	3.031	39.766	25	690A Sa Pobla subestació
32	1.434	39.039	160	912 Sant Miquel E. A.
33	3.029	39.435	22	355 Campos subestació
34	2.719	39.767	40	061A Soller II
35	3.021	39.773	25	690B Sa Pobla Escola
36	2.758	39.503	35	293A S'Arenal Parroquia
37	4.226	39.867	85	893 Aeroport de Menorca
38	2.714	39.736	1030	248 Puig d'Alfàbia
39	3.107	39.670	50	632 Maria de la Salut Montblanc
40	2.744	39.566	4	278 Palma Aeroport
41	4.258	39.852	60	801 Sant Lluís
42	1.534	38.989	25	964 Sta. Eulària
43	3.142	39.844	12	698 Alcúdia Butà
44	2.700	39.698	227	255 Bunyola
45	3.218	39.572	85	614 Manacor
46	3.054	39.735	50	682 Muro
47	2.910	39.725	140	678 Inca
48	2.888	39.491	140	334 Llucmajor II
49	2.626	39.555	3	228 Palma Centre Met.
50	4.158	39.968	120	820 Mercadal S'Albaida
51	2.653	39.585	35	228A Palma Urania
52	2.763	39.741	455	264 Bunyola Son Vidal
53	2.753	39.621	152	273 Sa Cabaneta
54	2.544	39.623	220	222A Son Puig
55	3.221	39.571	85	614C Manacor Parc Municipal
56	1.418	38.730	1	982 La Savina
57	3.024	39.744	30	691 Sa Pobla sa Canova
58	2.691	39.798	15	051 Far de sa Creu
59	2.601	39.563	80	229 Genova
60	2.422	39.576	75	115 Andratx
61	3.144	39.471	110	606B Felanitx III (Can Adrover)
62	4.106	40.002	80	826 Mercadal S'Arada
63	2.875	39.668	90	661 Binissalem Can Montcerdà
64	2.742	39.769	50	062 Soller sa Vinyassa
65	2.682	39.798	130	075 Far Punta Grossa
66	2.953	39.363	5	371 Sa Rapita
67	3.348	39.706	140	540 Artà sa Font Calenta
68	2.514	39.521	36	176 Sta. Ponsa Depuradora
69	3.104	39.796	2	605 Muro s'Albufera
70	4.325	39.877	78	800 Maó La Mola
71	3.064	39.408	40	362 Campos Can Sion
72	3.854	39.994	20	860 Ciutadella Son Quim
73	2.572	39.640	375	222B Es Verger
74	1.438	39.001	125	963 Sta. Gertrudis
75	2.939	39.145	5	398 Cabrera P. N.
76	1.494	39.058	110	908 Sant Joan de Llabritja
77	2.968	39.788	60	681 Campanet Son Estrany
78	2.925	39.739	145	675 Inca Son Estarás
79	1.295	38.919	190	948 Sant Josep
80	2.389	39.576	70	111A S'Arracó Cana Pera
81	2.760	39.670	155	269A Santa Maria Can Borreó
82	3.352	39.689	110	526 Artà Moli d'en Leu
83	2.714	39.592	37	277 Son Ferriol
84	4.212	39.952	17	810 Maó Estància ses Penyes

Taula 6. Referència completa de les estacions termomètriques de les figures 2 i 3

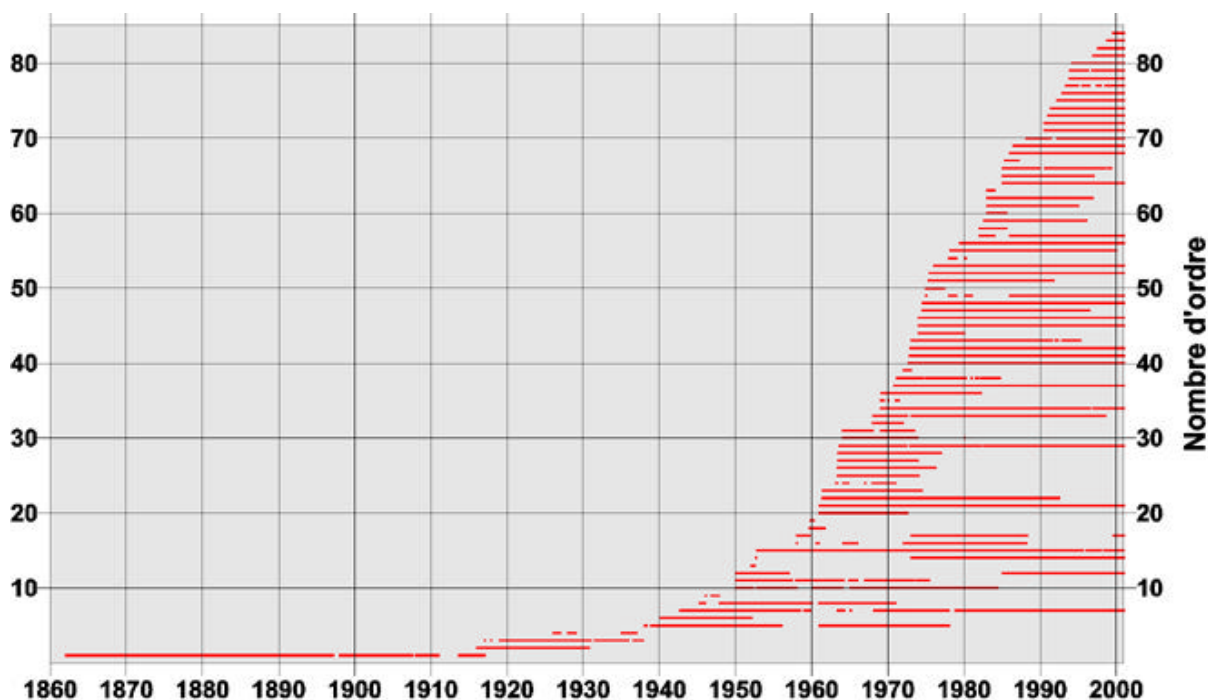


Fig. 23. Llargària de les sèries termomètriques. El nombre d'ordre correspon a l'indicat a la taula 6

La figura 24 mostra l'evolució de les temperatures mínimes mitjanes anuals a cada una de les estacions termomètriques considerades i la mitjana de totes elles. Es pot veure com l'aeroport de Palma té unes mínimes inferiors a la resta d'observatoris. La tendència a totes les estacions és positiva, clarament hi ha un augment de les temperatures mínimes. La tendència de la mitjana per a les Illes Balears mostra un augment de 7 °C cada 100 anys. La variabilitat de la sèrie està capturada en un 62% per la recta ajustada, tal com indica el coeficient de determinació.

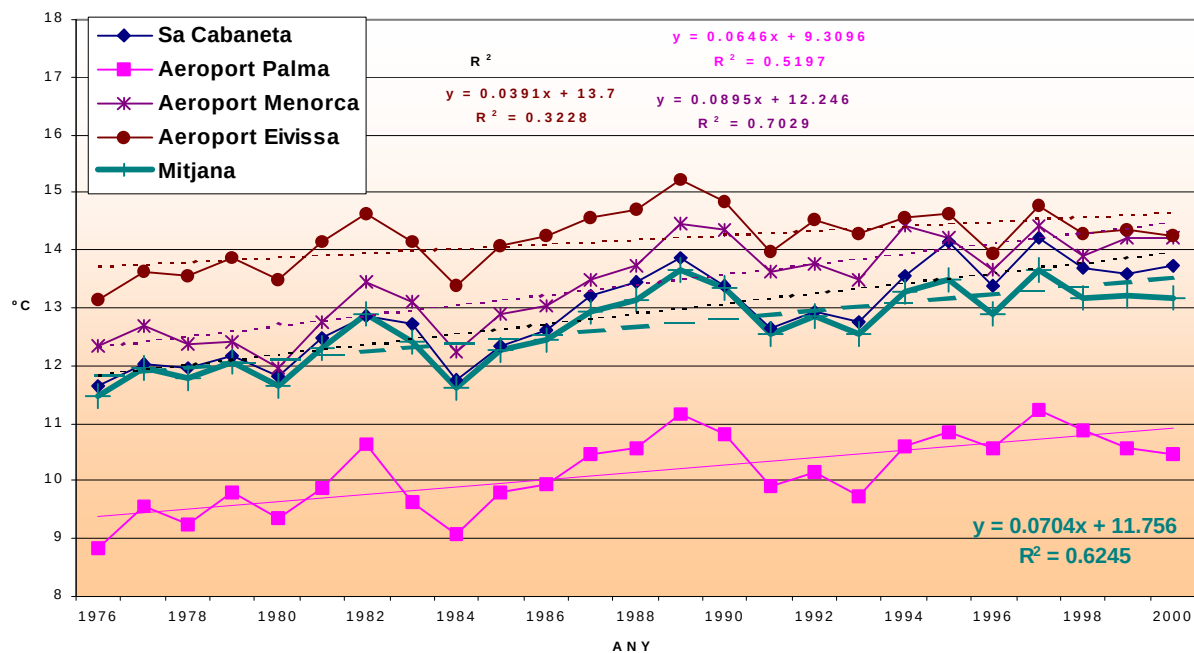


Fig. 24. Tendència de les temperatures mínimes mitjanes anuals

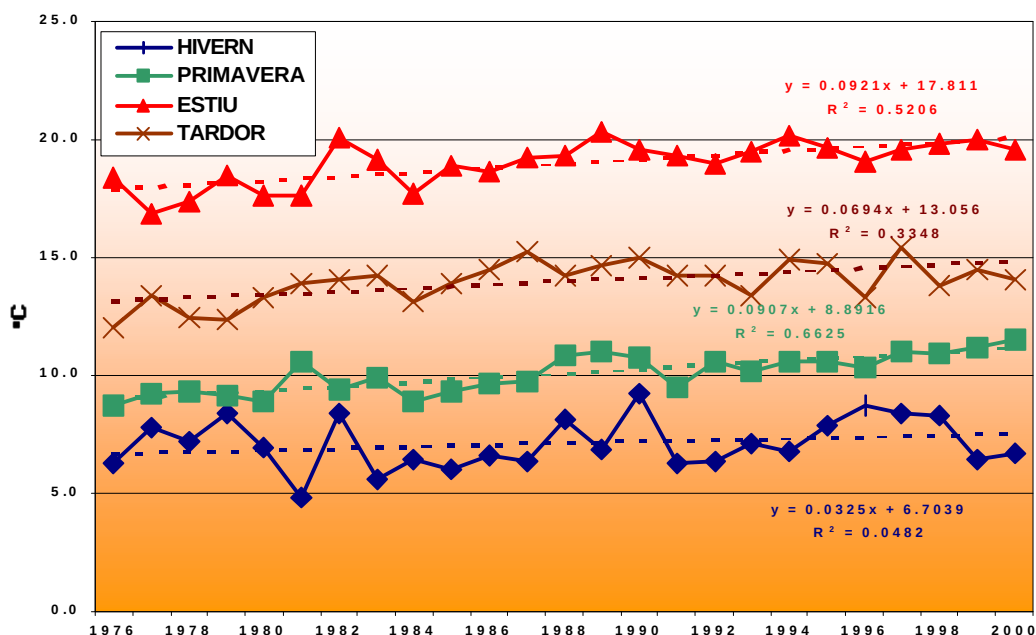


Fig. 25. Evolució de les temperatures mínimes mitjanes estacionals

S'han analitzat les tendències de les temperatures mínimes mitjanes estacionals, per determinar si hi ha diferències de comportament entre les diferents estacions climàtiques. La figura 25 mostra el resultat obtingut. Malgrat que la tendència és positiva per a totes les estacions, hi ha diferències clares. L'estiu i la primavera presenten un creixement molt més gran que la tardor mentre que a l'hivern l'augment és més feble, si bé en aquest cas la variabilitat de la sèrie és molt poc explicada per la recta ajustada.

Un estudi semblant s'ha dut a terme per a les temperatures màximes mitjanes. El resultat es presenta a la figura 26. Es pot veure que les temperatures màximes a l'aeroport de Menorca són inferiors a les dels altres observatoris, però que a tots segueixen una estructura semblant. Per a totes les estacions termomètriques considerades s'observa una tendència positiva. La mitjana de totes elles mostra una tendència positiva que representa un augment de 6 °C en 100 anys. La variabilitat de la sèrie de valors mitjans està ben representada per la recta ajustada (53%).

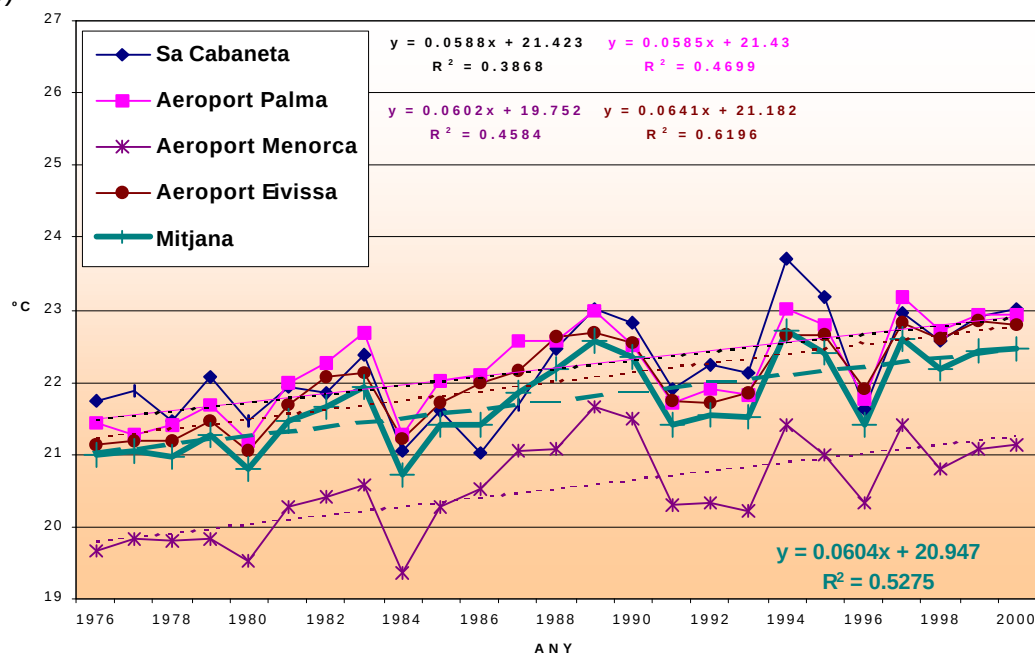


Fig. 26. Tendència de les temperatures màximes mitjanes anuals

També s'han considerat les sèries de valors corresponents a les estacions climàtiques i se n'ha estudiat la tendència. El resultat es presenta a la figura 27. Es pot veure com hi ha un augment de les temperatures màximes a totes les estacions. Destaca la primavera (10 °C en 100 anys) i l'estiu (6 °C en 100 anys), mentre que durant la tardor i l'hivern l'augment és inferior.

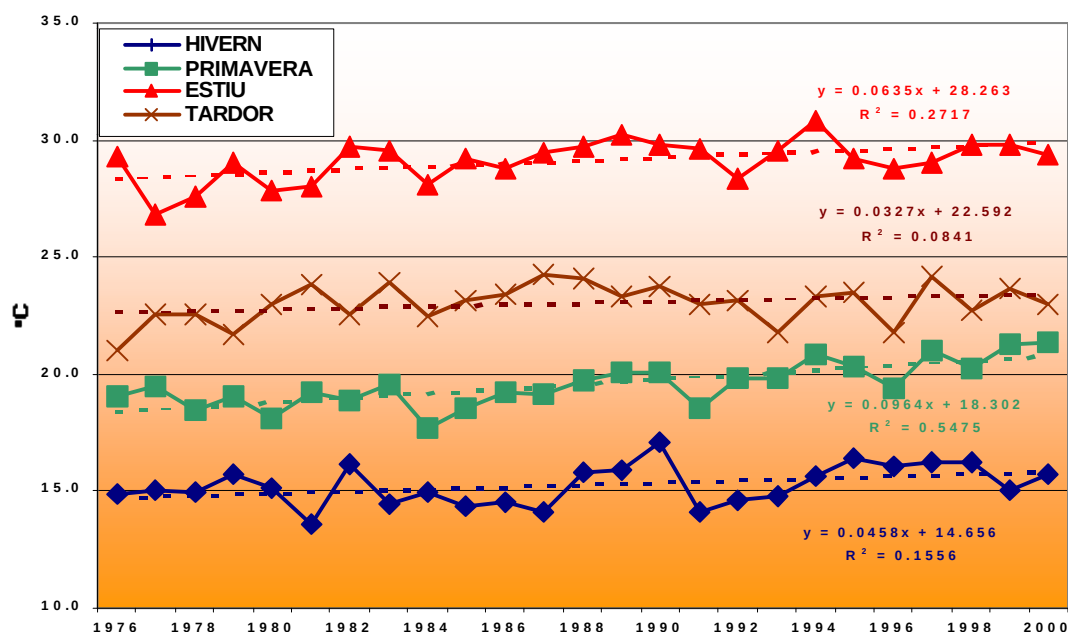


Fig. 27. Evolució de les temperatures màximes mitjanes estacionals

L'aplicació del test *t* de Student a les sèries termomètriques dona els resultats indicats a la taula 7.

Variable	Pendent (°C/100 anys)	Nivell de significància estadística del pendent (%)	Interval del pendent al 95% de significància estadística
Temperatura mínima mitjana anual	7,04	99,99	4,69 - 9,39
Temperatura mínima mitjana hivern	3,25	70,83	---
Temperatura mínima mitjana primavera	9,07	99,99	6,28 – 11,86
Temperatura mínima mitjana estiu	9,21	99,99	5,40 – 13,02
Temperatura mínima mitjana tardor	6,94	99,76	2,72 – 11,16
Temperatura màxima mitjana anual	6,04	99,99	3,57 – 8,51
Temperatura màxima mitjana hivern	4,58	95,00	0,00 – 9,18
Temperatura màxima mitjana primavera	9,64	99,99	5,86 – 13,42
Temperatura màxima mitjana estiu	6,35	99,25	1,87 – 10,83
Temperatura màxima mitjana tardor	3,27	84,03	---

Taula 7. Pendent, nivell de significància i interval del pendent al 95% de significància estadística per a les sèries termomètriques indicades.

2.2.2. Temperatures a la troposfera i baixa estratosfera

L'estació de radiosondatge de Palma, que està operant des del maig de 1958, és una font insubstituïble d'informació de l'estructura de la troposfera i de la baixa estratosfera sobre les Illes Balears. Aquesta estació va estar funcionant fins al març de 1988 a l'aeròdrom de Son Bonet i des d'aquesta data fins ara està situada al Centre Meteorològic a Palma (figura 28).

Des de la seva instal·lació ha realitzat dos sondejos diaris, a les 00 UTC i les 12 UTC (l'hora UTC pràcticament coincideix amb l'hora solar mitjana del meridià de Greenwich). L'operativitat durant la primera època del seu funcionament fou discontinua, algunes èpoques funcionà amb molta irregularitat per diferents motius: falta de material, avaries a l'equip i fins i tot un greu accident produït per l'explosió d'un globus. Durant l'època recent el funcionament ha estat molt regular amb molt poques faltes.

L'observació que es fa és un perfil vertical, sobre del punt de l'estació, de la temperatura, la humitat i el vent. Aquesta observació es fa mitjançant el llançament d'un petit equip anomenat radiosonda que, transportat per un globus inflat amb heli (anteriorment s'utilitzava hidrògen), puja a una velocitat aproximada de 300 metres per minut. Durant l'ascens, la radiosonda va comunicant per ràdio a l'estació de terra, la temperatura, la humitat i el vent que va trobant. La informació rebuda a terra serveix per confeccionar els perfils verticals indicats, per a fer anàlisis de l'estabilitat atmosfèrica i, també, per obtenir els mapes del temps actuals i com a informació per realitzar previsions a curt i mig termini.

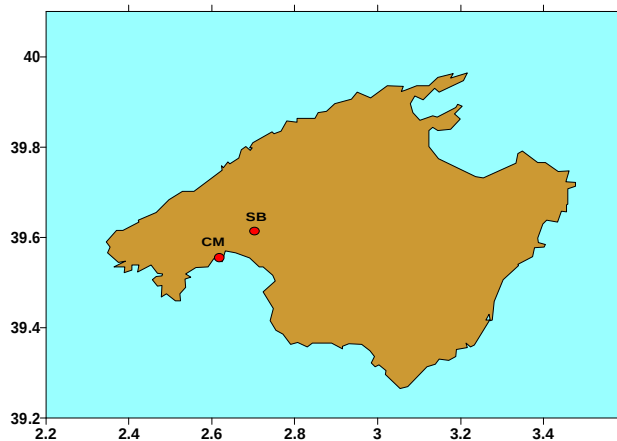


Fig. 28. Situació de la estació de radiosondes.
SB = Son Bonet, CM = Centre Meteorològic

Es varen obtenir del Centre Meteorològic Territorial en Illes Balears de l'Institut Nacional de Meteorologia les dades mitjanes mensuals de la temperatura a les 00 UTC per al període més llarg possible, a les altures de 1.500 metres i 5.500 metres per a la troposfera i 14.000 metres per a l'estratosfera. No es consideraren les dades de les 12 UTC per evitar la possible influència de la radiació diürna que pot afectar de forma notable a 1.500 metres. La indisponibilitat de dades informatitzades ha limitat l'estudi als anys 1981 a 2000. Les dades anteriors són pràcticament irrecuperables. El període indicat es pot considerar molt bo perquè pràcticament s'han dut a terme observacions la totalitat dels dies.

Amb els valors mitjans mensuals s'han determinat les mitjanes anuals per a cada una de les altures indicades. El resultat es pot veure a la figura 29 (línia blava). S'hi ha ajustat una recta per a determinar la tendència de la qual s'ha calculat el coeficient de determinació (R^2). El primer resultat que s'obté és que hi ha una alta variabilitat de les temperatures mitjanes anuals als tres nivells considerats i que la tendència és positiva a 1.500 metres i a 5.500 metres. La recta indica que la tendència de la temperatura és a augmentar de l'ordre de 2 °C per centúria. Al mateix temps, es demostra que la representativitat de la recta no és gaire bona ja que el coeficient de determinació és baix. A 14.000 metres, el resultat és absolutament diferent malgrat que la variabilitat anual sigui encara més gran que per als altres nivells indicats. En aquest cas la tendència és negativa i indica una disminució de 2 °C per centúria. La representativitat de la recta ajustada és inferior com a conseqüència de la major variabilitat de les dades.

Per eliminar part de la variabilitat observada i destacar el senyal de fons, s'ha aplicat un filtre passa-baixa del tipus mitjana mòbil amb una finestra de 5 anys (línia vermella de la figura 29). Es pot observar que les variacions són més suaus, però encara hi resta una forta variabilitat. Les rectes ajustades indiquen també un augment de les temperatures a 1.500 i 5.500 metres semblant a l'obtingut amb les dades no filtrades però amb una representativitat molt més significativa. A 14.000 metres el resultat és més espectacular ja que la tendència indica una disminució de 5 °C per centúria amb una representativitat semblant a la dels nivells inferiors.

S'ha dut a terme un estudi de l'evolució estacional de la temperatura. Mitjançant les mitjanes mensuals s'han determinat les mitjanes per a les estacions climàtiques de cada any. Els resultats són a la figura 30. Es pot veure que a 1.500 metres les rectes ajustades per a l'hivern i la primavera mostren una tendència positiva mentre que per a la tardor la tendència és negativa. Durant l'estiu gairebé no s'observa tendència. El coeficient de determinació és apreciable per la primavera i la tardor mentre que és molt baix per l'estiu. A 5.500 metres el resultat és bastant semblant a l'obtingut per al nivell inferior encara que durant l'estiu la recta de tendència mostra un pendent lleugerament positiu. A 14.000 metres la temperatura estacional mostra una variabilitat un poc més gran, sense separar-se clarament les estacions. L'hivern i la primavera presenten una tendència negativa, mentre que per a l'estiu i la tardor la tendència és positiva.

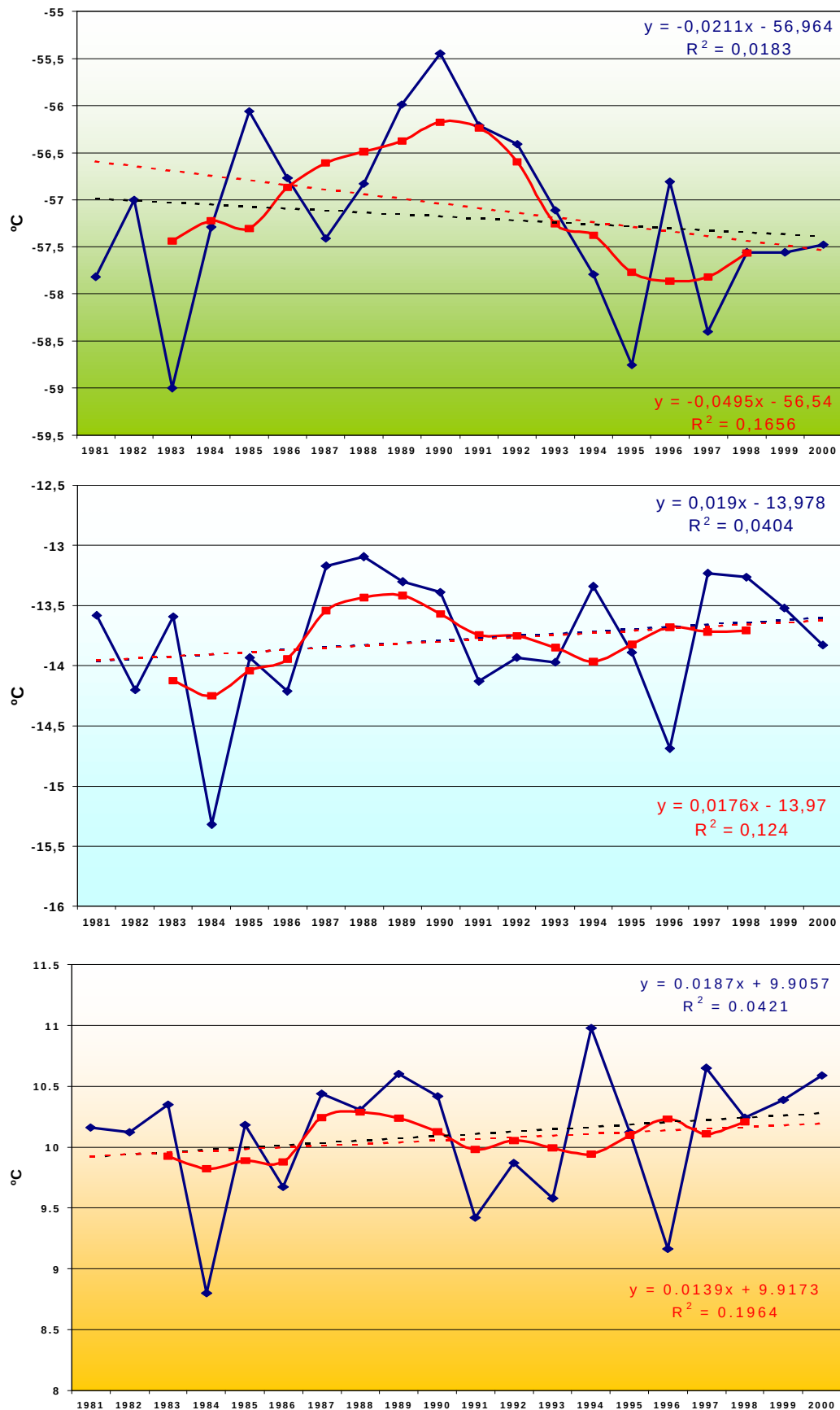


Fig. 29. Tendències de les temperatures mitjanes anuals durant el període 1981-2000 sobre les Illes Balears. Panells a) a 14.000 m, b) a 5.500 m i c) a 1.500 m

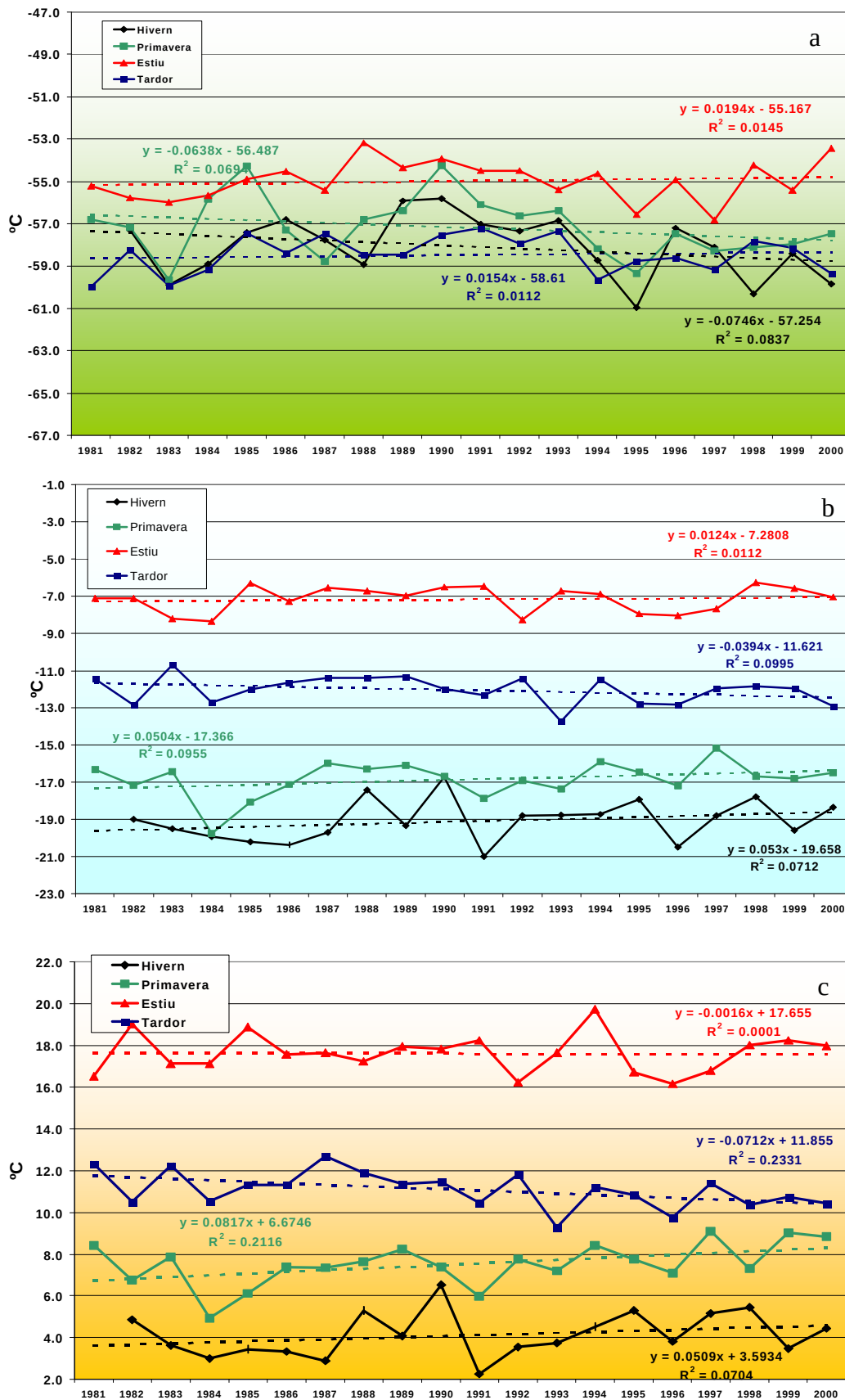


Fig. 30. Tendència de les temperatures mitjanes estacionals durant el període 1981-2000 sobre les Illes Balears. Panells a) a 14.000 m, b) a 5.500 m i c) a 1.500 m

El test *t* de *Student* mostra la baixa significància estadística dels pendents obtinguts (taula 8), que en bona part es deu a que les series temporals són curtes i presenten una gran variabilitat temporal.

Variable	Pendent (° C/100 anys)	Nivell de significància estadística del pendent (%)	Interval del pendent al 95% de significància estadística
Temperatura mitjana anual a 14000 m	-2,11	43,04	---
Temperatura mitjana anual a 14000 m, mitja mòbil de 5 anys	-4,95	88,23	---
Temperatura mitjana anual a 5500 m	1,90	60,45	---
Temperatura mitjana anual a 5500 m, mitja mòbil de 5 anys	1,76	81,90	---
Temperatura mitjana anual a 1500 m	1,87	61,45	---
Temperatura mitjana anual a 1500 m, mitja mòbil de 5 anys	1,39	91,44	---
Temperatura mitjana hivern a 14000 m	-7,46	78,40	---
Temperatura mitjana primavera a 14000 m	6,38	73,68	---
Temperatura mitjana estiu a 14000 m	1,94	38,69	---
Temperatura mitjana tardor a 14000 m	1,54	34,30	---
Temperatura mitjana hivern a 5500 m	5,30	74,46	---
Temperatura mitjana primavera a 5500 m	5,04	81,51	---
Temperatura mitjana estiu a 5500 m	1,24	34,30	---
Temperatura mitjana tardor a 5500 m	3,94	82,45	---
Temperatura mitjana hivern a 1500 m	5,09	74,18	---
Temperatura mitjana primavera a 1500 m	8,17	95,87	0,36 – 15,98
Temperatura mitjana estiu a 1500 m	-0,16	3,34	---
Temperatura mitjana tardor a 1500 m	-7,12	96,89	-13,52 - -0,70

Taula 8. Pendent, nivell de significància i interval del pendent al 95% de significància estadística per a les sèries termomètriques indicades.

3. Anàlisi de les tendències climàtiques a les Illes Balears per als propers cent anys a partir de models climàtics globals

S'han obtingut del centre Hadley (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>) les dades de les mitjanes mensuals de les temperatures màxima i mínima i de la precipitació mensual des de 1990 al 2099 per a l'experiment HadCM2-HCGSa1. La descripció de l'escenari es farà més endavant.

El model HadCM2 és un model acoblat atmosfera-oceà que té una resolució espacial de 2,5 graus x 3,75 graus (latitud per longitud) tant sobre l'oceà com sobre terra, la qual cosa produeix una xarxa global de 96 x 73 punts de xarxa. Això és equivalent a una resolució espacial de 278 km x 417 km a l'equador que es redueix a 278 km x 295 km a 45 graus de latitud. El model té 19 nivells a l'atmosfera i 20 nivells a l'oceà. Es consideren 4 tipus de sòl, que inclou gel, i la part hidrològica permet escorrentia superficial i penetració d'aigua al sòl. Es considera tant precipitació de tipus convectiu com de gran escala. L'esquema de radiació té en compte l'absorció de radiació pels gasos traça.

A causa de la baixa resolució del model, els continents i l'orografia estan representats de forma poc precisa com es pot veure a la figura 31. En particular es pot veure que les Illes Balears no hi estan representades.

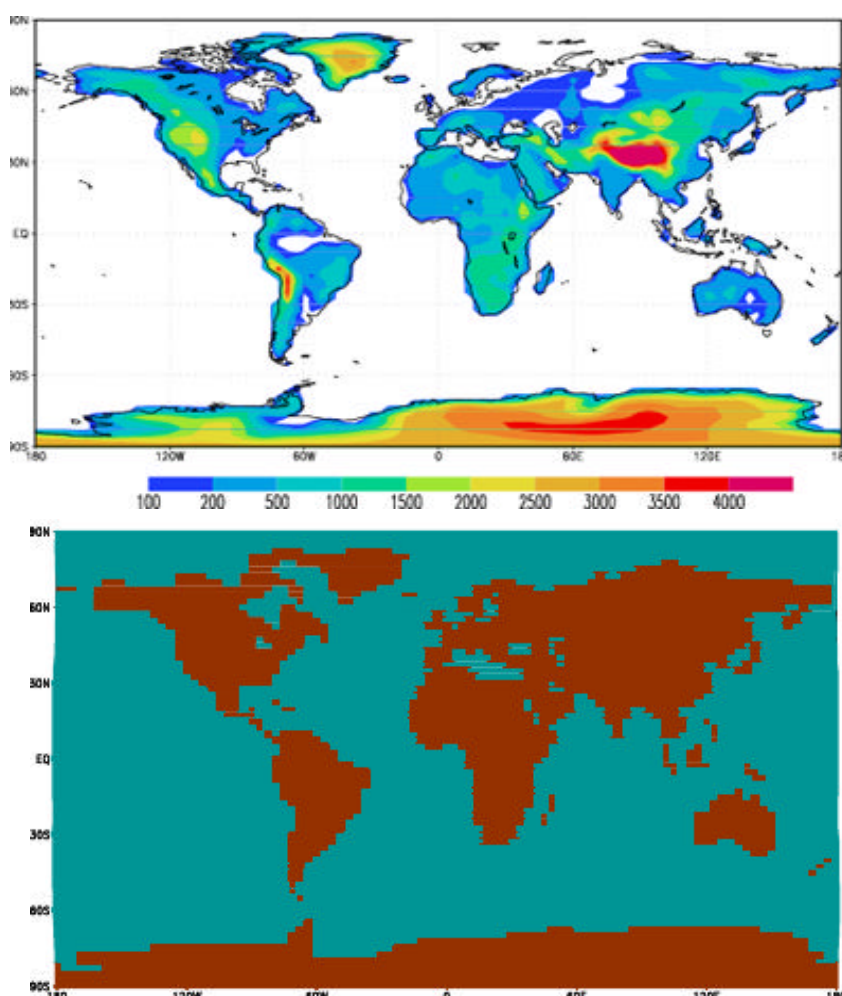


Fig. 31. Topografia i màscara terra-oceà per al model HadCM2

Per obtenir valors de les variables meteorològiques a les Illes Balears es podrien considerar els valors al punt de xarxa més pròxim a les Illes. No és convenient considerar un sol punt de xarxa perquè pot tenir particularitats, per la qual cosa s'han considerat nou punts de xarxa, que envolten la zona de les Illes Balears. Aquests punts de xarxa es poden veure a la figura 32. Els valors de temperatura i precipitació que es mostraran corresponen als valors mitjans de les variables a aquests nou punts.

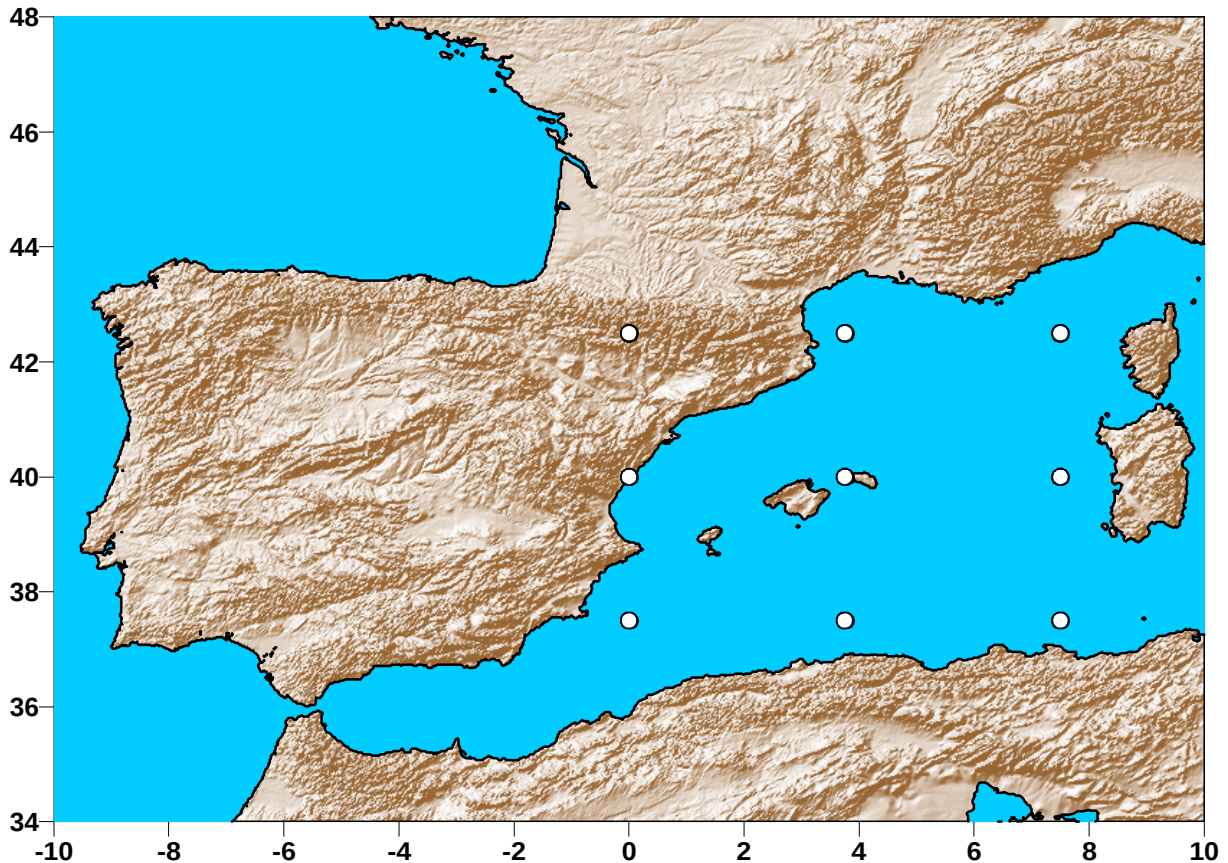


Fig. 32. Punts de xarxa del models climàtics HadCM2 emprats per a l'estudi de tendències futures

A la simulació HadCM2-HCGSa1 es considera el següent:

- El CO₂ canvia amb les dades històriques des de 1860 a 1989. Des del 1990 al 2099 se suposa un augment anual de l'1%.
- El SO₄ (que actua en contra de l'efecte hivernacle) canvia amb les dades històriques des de 1860 a 1989. La concentració des de 1990 a 2100 és calculada de les emissions de sulfurs de l'escenari socioeconòmic.
- L'escenari socioeconòmic és el conegut com a IS92d de l'IPCC. Les hipòtesis més importants son:
 - a) Població: el cas mig-baix de les Nacions Unides, la qual cosa representa 6.400 milions d'habitants el 2100.
 - b) Creixement econòmic: 2,7 % mitjà des del 1990 al 2025 i 2,0% mitjà des del 2026 al 2100.
 - c) Fonts d'energia: 8.000 EJ de petroli, 7300 EJ de gas natural i disminució dels costos de l'energia nuclear del 0,4% anual ($1\text{EJ}=10^{18}$ Joules)
 - d) Clor-fluor-carbonis (CFCs): aturada de la producció el 1997 als països industrialitzats.
 - e) Altres: control d'emissions a tot el món de CO, NO_x, VOCs diferents del metà i SO_x. Aturada de la desforestació. Captura i utilització de les emissions derivades de la mineria i la producció i ús del gas.

La figura 33 mostra les tendències de les mitjanes anuals de les temperatures màximes, mitjanes i mínimes deduïdes del model. A les sèries temporals s'hi ha aplicat un filtre passa-baixa de la mitjana mòbil de 5 anys per eliminar les fortes oscil·lacions i a les sèries filtrades s'ha ajustat una recta. Es pot veure que, en els tres casos, la tendència mostra un augment de les temperatures a un ritme de 3 °C cada 100 anys. En el tres casos la recta ajustada presenta una molt bona representativitat de les dades perquè explica entre el 89 i el 90% de la variabilitat observada. Tal volta el que crida més l'atenció de la gràfica és la poca diferència que hi ha entre les màximes i les mínimes, que es manté sobre els 3 graus. Aquesta poca diferència és explicable en termes de la posició dels punts utilitzats de la xarxa, la major part dels quals estan situats al model sobre la mar i per això les temperatures no sofreixen grans canvis durant un cicle diurn. Per ajustar aquesta resposta a una forma més propera a la realitat, s'han de comparar les dades de temperatura del model amb dades instrumentals durant una època per la qual es disposi dels dos tipus de dades i obtenir-ne així una relació. Es un procés de *downscaling* del qual es mostren els resultats més endavant.

S'ha estudiat la tendència de les temperatures màximes, mitjanes i mínimes considerant la seva distribució estacional. Els resultats es presenten a la figura 34. Les temperatures màximes tenen tendència a augmentar durant les quatre estacions, però és durant l'hivern quan s'observa una tendència més gran amb 3,5 °C cada 100 anys. Les rectes ajustades expliquen entre el 56 i el 61% de la variabilitat de les dades. Quant a les temperatures mitjanes, el que el model indica és que també aniran augmentant progressivament, principalment durant l'hivern amb 3,6 °C cada 100 anys. El mateix es pot dir per a les temperatures mínimes però, en aquest cas, la tendència indica un augment de 3,7 °C cada 100 anys durant l'hivern amb augments menors a les altres estacions.

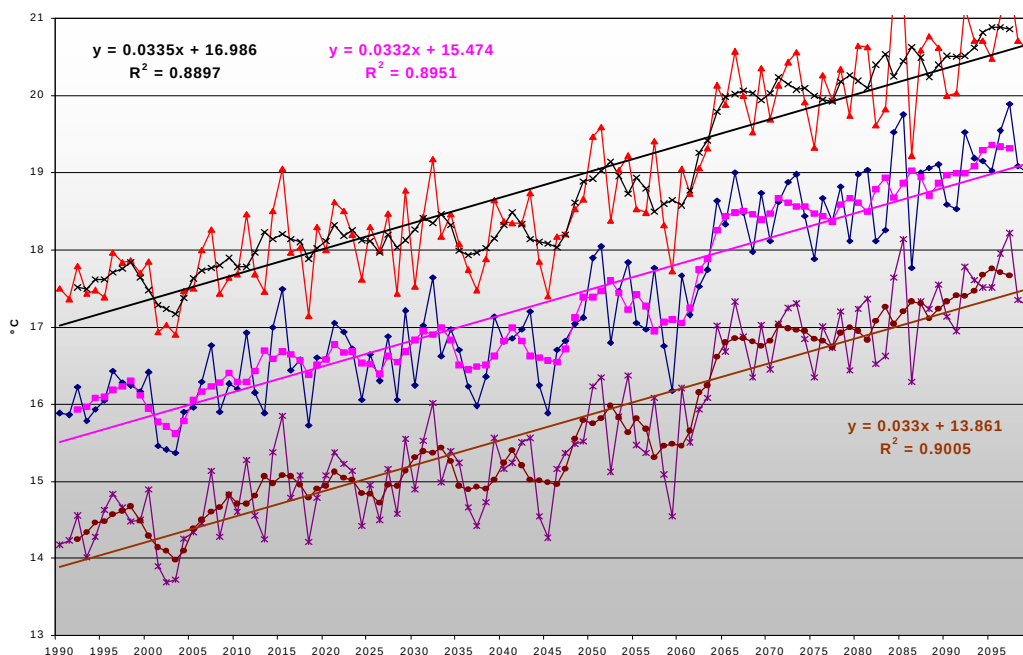


Fig. 33. Tendència de la mitjana anual mòbil de 5 anys de les temperatures màxima, mitjana i mínima (simulació HadCM2-HCGSa1) durant el període 1990-2099 a les Illes Balears

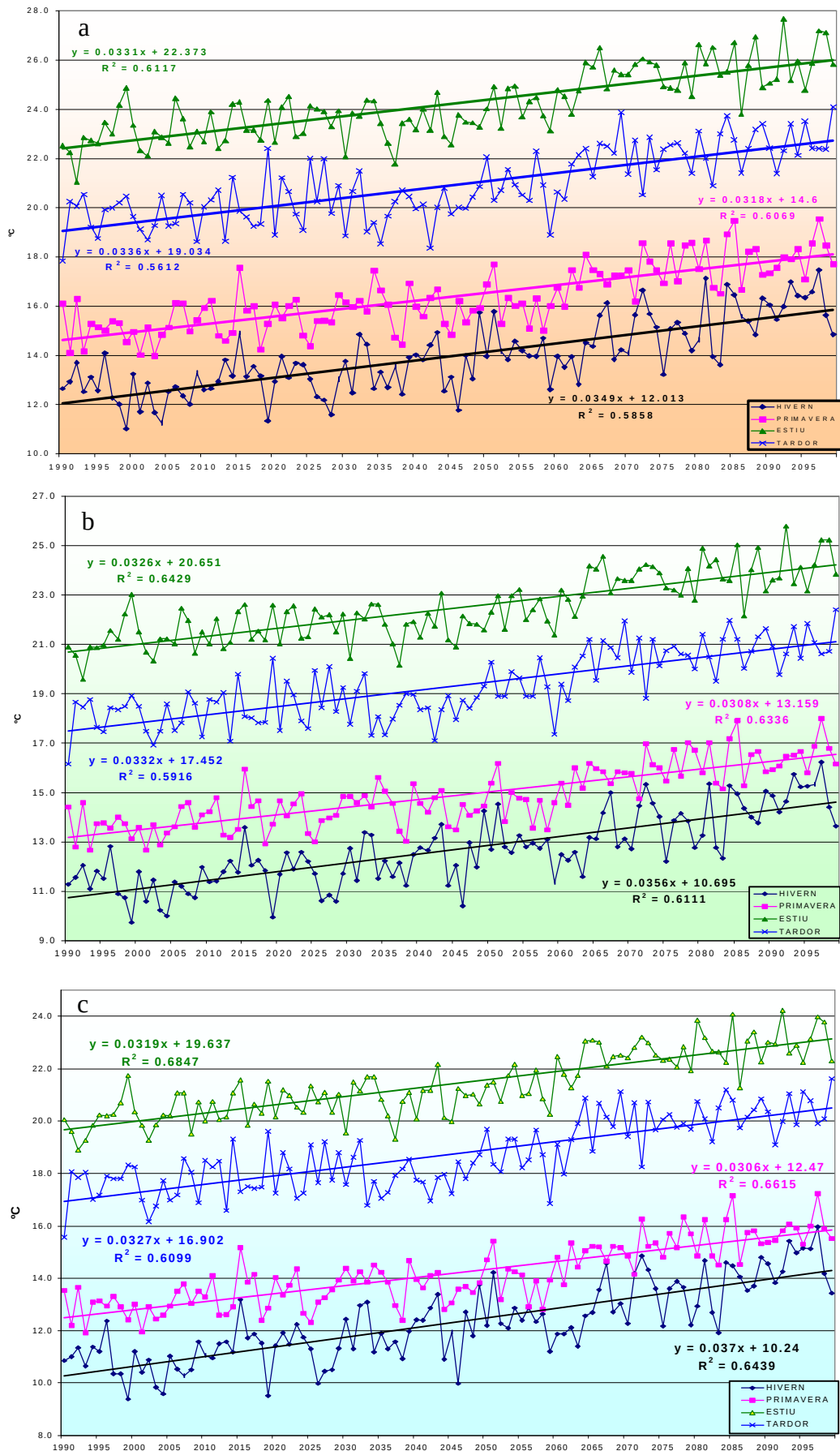


Fig. 34. Tendència de les temperatures mitjanes estacionals (simulació HadCM2-HCGSa1) durant el període 1990-2099 a les Illes Balears. Panell a) màximes, b) mitjanes, c) mínimes

El resultat d'aplicar el test *t* de Student a les sèries temporals de temperatura del model HadCM2-HCGSa1 es mostra a la taula 9.

Variable	Pendent (° C/100 anys)	Nivell de significància estadística del pendent (%)	Interval del pendent al 95% de significància estadística
Temperatura mínima mitjana anual, mitjana mòbil de 5 anys	3,30	99,99	3,09 – 3,51
Temperatura mitjana anual, mitjana mòbil de 5 anys	3,32	99,99	3,10 – 3,54
Temperatura màxima mitjana anual, mitjana mòbil de 5 anys	3,35	99,99	3,12 – 3,58
Temperatura màxima mitjana hivern	3,49	99,99	2,93 – 4,05
Temperatura màxima mitjana primavera	3,18	99,99	2,69 – 3,67
Temperatura màxima mitjana estiu	3,31	99,99	2,81 – 3,81
Temperatura màxima mitjana tardor	3,36	99,99	2,79 – 3,93
Temperatura mitjana hivern	3,56	99,99	3,02 – 4,10
Temperatura mitjana primavera	3,08	99,99	2,63 – 3,53
Temperatura mitjana estiu	3,26	99,99	2,80 – 3,72
Temperatura mitjana tardor	3,32	99,99	2,80 – 3,85
Temperatura mínima mitjana hivern	3,70	99,99	3,18 – 4,22
Temperatura mínima mitjana primavera	3,06	99,99	2,64 – 3,48
Temperatura mínima mitjana estiu	3,19	99,99	2,78 – 3,60
Temperatura mínima mitjana tardor	3,27	99,99	2,77 – 3,77

Taula 9. Pendent, nivell de significància i interval del pendent al 95% de significància estadística per a les sèries termomètriques indicades.

Quant a la precipitació, s'han analitzat els resultats que el model ofereix per al segle XXI. La figura 35 mostra la precipitació anual i la seva evolució des de 1990 fins al 2099 (línia vermella). El primer que ressalta és una gran variabilitat interanual, anys amb quantitats importants de pluja van seguits per altres de poca precipitació. Per eliminar aquesta variabilitat interanual i ressaltar-ne les tendències s'ha aplicat a la sèrie temporal un filtre de mitjanes mòbils amb una finestra de 5 anys. Es pot veure que la línia ajustada a cada una de les sèries indica una variació molt petita de la precipitació anual però al mateix temps aquesta línia dona molt poc compte de la variabilitat de la sèrie.

També s'han analitzat les tendències de la mitjana mòbil de 5 anys de les precipitacions estacionals, que es poden veure a la figura 36. Les sèries estacionals presenten una variabilitat interanual molt gran. Cal destacar que les majors quantitats de precipitació es continuaran produint durant la tardor. Al mateix temps, les precipitacions estivals continuaran molt baixes. També és pot ressenyar que la precipitació durant l'hivern té tendència a augmentar (uns 28 mm en 100 anys), mentre que la precipitació a les altres estacions té tendència a disminuir lleugerament. En qualsevol cas la variabilitat és molt gran i per això l'explicació de la variabilitat per la recta ajustada és petita.

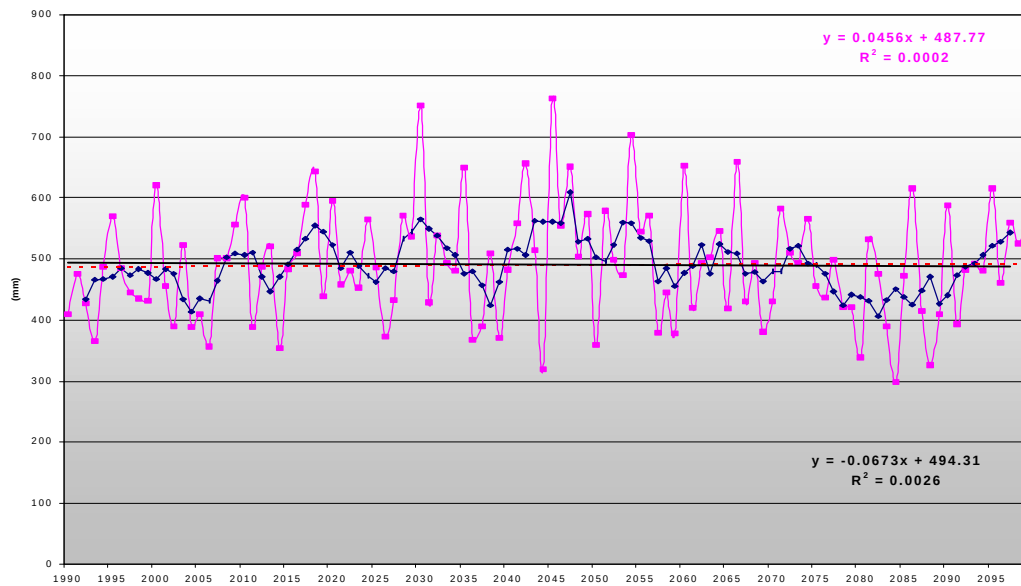


Fig. 35. Tendències de la precipitació anual (simulació HadCM2-HCGSa1) i de la mitjana mòbil de 5 anys durant el període 1990-2099 a les Illes Balears

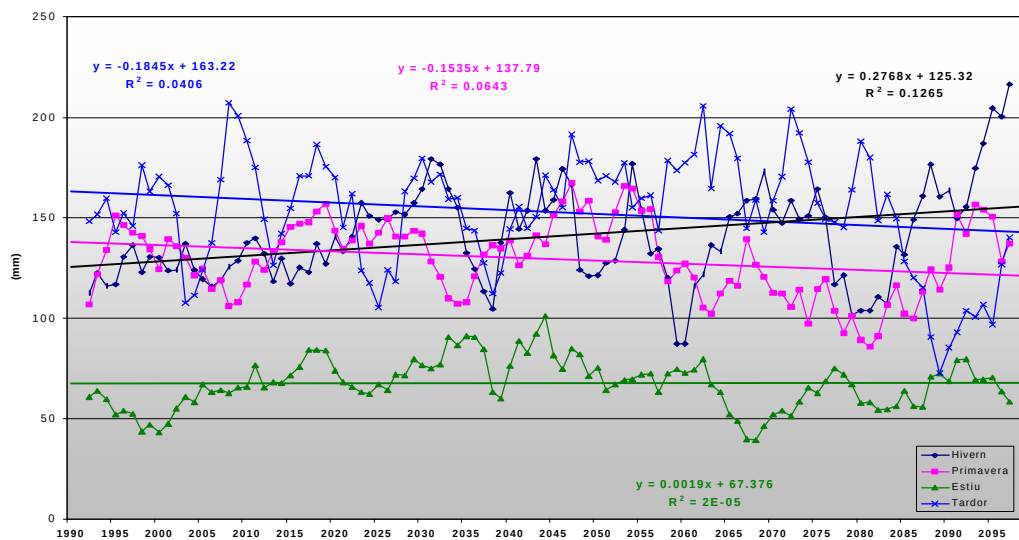


Fig. 36. Tendència de la mitjana mòbil de 5 anys de la precipitació estacional (simulació HadCM2-HCGSa1) durant el període 1990-2099 a les Illes Balears

Per a les sèries pluviomètriques del HadCM2-HCGSa1 el test *t* de Student dóna els valors indicats a la taula 10.

Variable	Pendent (mm/100 anys)	Nivell de significància estadística del pendent (%)	Interval del pendent al 95% de significància estadística
Precipitació mitjana anual	4,56	11,66	---
Precipitació mitjana anual, mitjana mòbil 5 anys	-6,73	39,63	---
Precipitació mitjana hivern, mitjana mòbil 5 anys	27,68	99,98	13,54 - 41,82
Precipitació mitjana primavera, mitjana mòbil 5 anys	-15,35	99,13	-26,74 - -4,00
Precipitació mitjana estiu, mitjana mòbil 5 anys	0,19	36,29	---
Precipitació mitjana tardor, mitjana mòbil 5 anys	-18,45	96,17	-35,89 - -1,00

Taula 10. Pendent, nivell de significància i interval del pendent al 95% de significància estadística per a les sèries pluviomètriques indicades.

Per ajustar els resultats del model a les Illes Balears, cal dur a terme un procés d'adaptació dels valors donats pel model a la regió. Aquest procés es coneix com a *downscaling*. En aquest estudi hem dut a terme aquesta adaptació per a les temperatures màximes i mínimes mitjançant un mètode simple que es descriu a continuació. S'han considerat separatament les màximes i les mínimes però, per a cada una de les variables, s'ha seguit el mateix procediment.

S'han considerat els valors mensuals mitjans durant el període 1990-2000, que són els anys en que coincideixen els valors instrumentals amb els valors del model. S'han separat les estacions climàtiques i s'han comparat per a cada una els valors corresponents, i s'ha determinat la recta que s'ajusta més a cada un dels quatre grups de valors. El resultat per a les temperatures mínimes es pot veure a la figura 37 i per a les màximes a la figura 39. A ambdues figures es pot veure com la relació entre els valors observats i els valors del model no segueixen la mateixa llei durant tot l'any, hi ha un diferent comportament que depèn de l'estació climàtica. En particular, es pot veure que un mateix valor donat pel model no es transforma amb el mateix valor observat durant la tardor o durant l'estiu, per exemple. És interessant que la relació durant l'hivern és menys forta que durant les altres tres estacions.

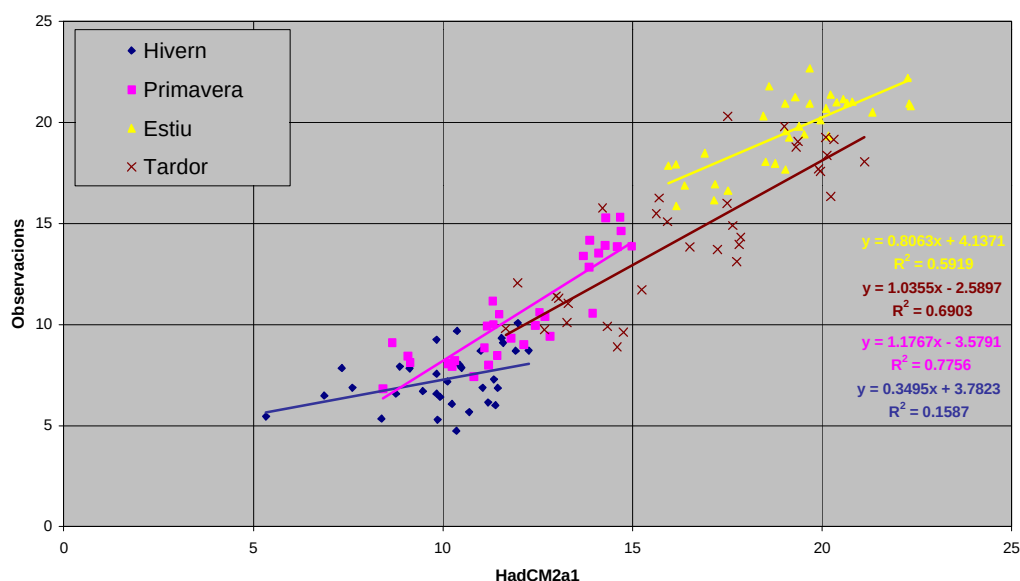


Fig. 37. Calibració de les temperatures mínimes

Una vegada obtinguda la relació entre les temperatures observades i les donades pel model, els valors mensuals del model es poden transformar segons la llei que correspon al mes, tenint en compte la definició d'estació climàtica. Feta aquesta transformació, es poden determinar les mitjanes anuals i atribuir-les a la regió corresponent.

La figura 38 mostra el resultat d'aplicar la transformació a les temperatures mínimes. Es pot veure com les temperatures corregides són inferiors a les donades pel model (recordem que la majoria dels punts de malla considerats estan sobre la mar). La sèrie de valors corregida presenta una estructura semblant però no idèntica a la dels valors originals del model. També s'observa que la tendència d'aquesta sèrie corregida és positiva i mostra un augment de les temperatures mínimes mitjanes anuals de 2,7°C cada 100 anys, inferior a la donada pels valors originals del model (3,3 °C cada 100 anys).

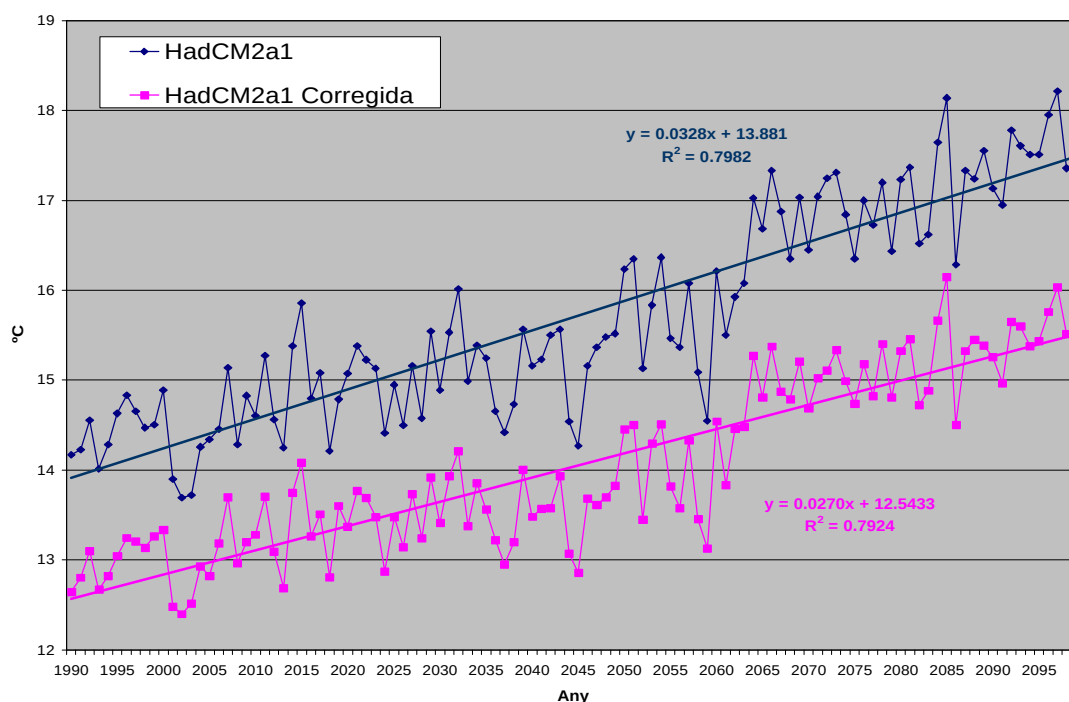


Fig. 38. Temperatures mínimes mitjanes anuals corregides

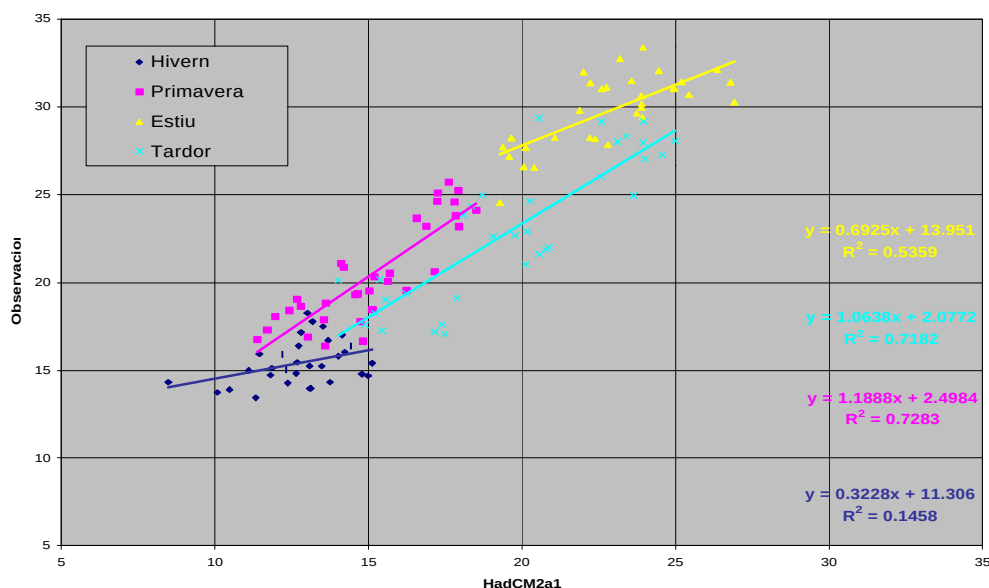


Fig. 39. Calibració de les temperatures màximes

La figura 40 mostra el resultat d'aplicar la transformació a les temperatures màximes. La sèrie de valors corregits té tots els valors superiors a la sèrie original, de l'ordre de 5 °C. El resultat és també compatible amb el fet que els punt de malla del model estan situats sobre la mar. La sèrie corregida mostra igualment una tendència positiva amb un augment de les temperatures màximes mitjanes anuals de 2,7 °C cada 100 anys, valor inferior a l'indicat per la sèrie original (3,3 °C cada 100 anys).

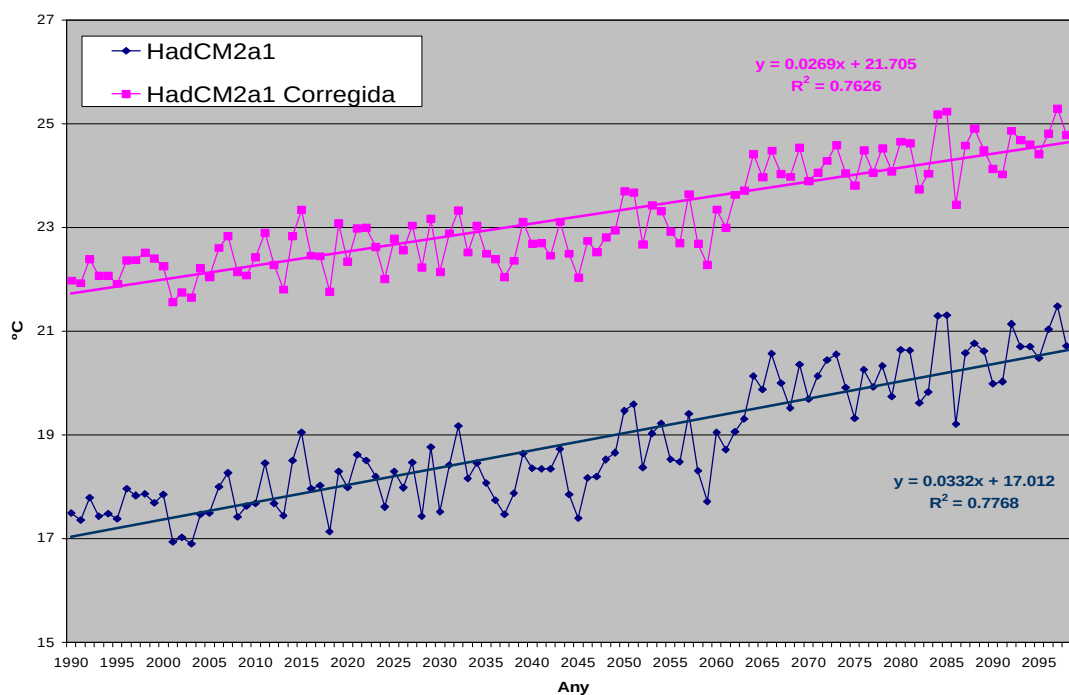


Fig. 40. Temperatures màximes mitjanes anuals corregides

Per a les calibracions i sèries termomètriques del HadCM2-HCGSa1, el test *t* de *Student* dona els valors indicats a les taules 11 i 12.

Variable	Pendent	Nivell de significància estadística del pendent (%)	Interval del pendent al 95% de significància estadística
Calibració Hivern, temperatures mínimes	0,35	97,36	0,04 - 0,66
Calibració Primavera, temperatures mínimes	1,18	99,99	0,94 - 1,41
Calibració Estiu, temperatures mínimes	0,81	99,99	0,56 - 1,05
Calibració Tardor, temperatures mínimes	1,04	99,99	0,78 - 1,29
Calibració Hivern, temperatures màximes	0,32	96,90	0,03 – 0,61
Calibració Primavera, temperatures màximes	1,19	99,99	0,92 - 1,45
Calibració Estiu, temperatures màximes	0,69	99,99	0,46 - 0,93
Calibració Tardor, temperatures màximes	1,06	99,99	0,82 – 1,31

Taula 11. Pendent, nivell de significància i interval del pendent al 95% de significància estadística per a la calibració de temperatures.

Variable	Pendent (°C/100 anys)	Nivell de significància estadística del pendent (%)	Interval del pendent al 95% de significància estadística
Temperatura mínima mitjana anual, HadCM2-HCGSa1	3,28	99,99	2,96 – 3,59
Temperatura mínima mitjana anual, corregida	2,70	99,99	2,44 - 2,96
Temperatura màxima mitjana anual, HadCM2-HCGSa1	3,32	99,99	2,98 - 3,66
Temperatura màxima mitjana anual, corregida	2,69	99,99	2,40 – 2,98

Taula 12. Pendent, nivell de significància i interval del pendent al 95% de significància estadística per a les sèries termomètriques indicades.

4. Conclusions

Les principals conclusions que es poden deduir d'aquest estudi són:

L'anàlisi de la precipitació amb dades instrumentals indica una alta variabilitat interanual de la precipitació total anual. Malgrat això, es manifesta una disminució de la precipitació total anual tant a la sèrie original com a les sèries filtrades amb una significància estadística superior al 95%. La variabilitat interanual és encara més gran a les sèries de precipitació estacional, les quals demostren una disminució de la precipitació a totes les estacions climàtiques, malgrat la significància estadística només és superior al 95% per a les sèries filtrades de l'hivern i de la tardor. Les precipitacions diàries febles i moderades (1-16 mm) i les torrencials (>64 mm) tenen tendència a augmentar la seva contribució a la precipitació total anual; mentre que les precipitacions diàries fortes (16-64 mm) tenen tendència a disminuir-ne la contribució. La significància estadística només és superior al 95% per a les categories a i c1. El nombre anual de dies amb pluja feble (1-4 mm) tendeix a augmentar, el de dies amb pluja moderada o forta (4-64 mm) tendeix a disminuir, mentre que no s'observa canvi en el nombre de dies de pluja torrencial (>64 mm). En aquest cas, la significància estadística és superior al 95% per a les categories a, b, c1 i c2.

Les temperatures mitjanes anuals màximes i mínimes tendeixen a augmentar. La tendència obtinguda indica 6-7 °C cada 100 anys amb significància estadística superior al 95%. Els augments més grans corresponen a l'estiu i la primavera i el més petit a l'hivern. La significància estadística de la temperatura mínima mitjana durant l'hivern i de la màxima mitjana durant la tardor no supera el 95%.

A l'atmosfera lliure s'ha d'assenyalar que existeix una tendència positiva de la temperatura mitjana anual a la troposfera, 1500 i 5500 m, mentre que a l'estratosfera, 14000 m, la tendència és negativa. S'observa un diferent comportament estacional, molt marcat a 1500 m, on l'augment de temperatura és important durant l'hivern i la primavera, el canvi és pràcticament nul durant l'estiu i hi ha un decreixement durant la tardor. Aquestes tendències no són significatives doncs el nivell de significància és inferior al 95% per quasi totes les sèries considerades, fet atribuïble a la poca llargària que tenen i a la seva alta variabilitat.

Quant a les tendències durant el segle XXI, el model considerat, HadCM2 del centre Hadley, amb l'escenari socioeconòmic IS92d de l'IPCC, indica un augment de les temperatures mitjanes anuals màximes i mínimes de 3 °C per a final de segle. L'augment més important correspon a l'hivern. Totes les tendències són significatives a un nivell superior al 95%. Respecte a la precipitació anual, el model indica una forta variabilitat interanual. No s'observa una tendència clara, doncs la representativitat de la recta ajustada és baixa com a conseqüència de l'alta variabilitat. El nivell de significància estadística és molt baix tant a la sèrie original com a la filtrada, la qual cosa no permet cap afirmació sobre la tendència. Hi ha grans diferències en la precipitació estacional. La tardor continua com a l'estació més plujosa però apareix amb una tendència clara a disminuir la precipitació (significància superior al 95%). L'estiu continua com a l'estació seca. És importat destacar la tendència a augmentar la precipitació durant l'hivern, amb un nivell de significància superior al 95%.

Referències

Guijarro, J. A. (1986): *Bioclimatología de las Islas Baleares*. Tesis doctoral. Universitat de les Illes Balears.

Harnett, D. L. and A. K. Soni (1991): *Statistical Methods for business and economics*. Addison-Wesley P. C.

<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/> per a informació sobre models climàtics i obtenir dades de diferents models.

IPCC (2001): *Third assesment report. Climate change 2001*. Cambridge Univ. Press (3 volumens)

Sumner, G.N., V. Homar and C. Ramis (2001): Precipitation seasonality in eastern and southern coastal Spain. *Inter. J. Climatol.*, 21, 219-247.

Walsh P. D. and D. M. Lawler (1981): Rainfall seasonality: description, spatial patterns and change through time. *Weather*, 36, 201-208.