

EL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE

LA REGIÓN DE MURCIA:

ESCENARIOS E IMPACTOS POSIBLES EN EL SIGLO XXI

I. Introducción: fundamentos de la hipótesis de Cambio Climático.

Toda una gran serie de anomalías, especialmente la progresiva elevación de las temperaturas, las alteraciones del régimen pluviométrico y los numerosos sucesos excepcionales, detectados recientemente en los elementos climáticos regionales y mundiales, ha llevado a interrogarnos sobre la causa y perspectivas futuras de las mismas. La búsqueda de un modelo climático para los albores del siglo XXI, que integre todas las anomalías observadas, se ha convertido así en uno de los mayores retos científicos actuales. No es para menos por cuanto que el mayor impacto ambiental previsto para los próximos cincuenta o cien años viene constituido por el cambio climático global, en su mayor parte causado por la actividad humana.

En el eje de estas anomalías se halla la observación de que desde principios del siglo XIX, se viene asistiendo al final de la época fría que caracterizó al clima mundial entre los siglos XIV y XVIII. Los datos mejor establecidos, en *grids* hemisféricos y globales, comprenden ya el análisis de 2.666 estaciones, de las que 118 comenzaron en 1860 y 509 en 1900 para el Hemisferio Norte, mientras que en el Hemisferio Sur, el estudio se realiza sobre 610 estaciones si bien tan solo siete de ellas se inician en 1860 y 45 en el comienzo del siglo XX (P. D. JONES et al., 1986; P. D. JONES et al. 1991; P. D. JONES et al., 1994; H. WILSON and J. JANSEN, 1994; K. Y. VINNIKOV et al., 1994; P. D. JONES, 1996; P. D. JONES et al., 2000). Estos análisis permiten afirmar que, a partir de 1880, la mayor parte de los observatorios mundiales han registrado una elevación térmica. Este aumento de las temperaturas en el Hemisferio Norte, durante todo el siglo XX, ha sido estimado en 0'7 y 0'8º C, tratando de corregir en lo posible el efecto generalizado de la urbanización, proceso que suscita serias interrogantes. En todo caso, esa elevación térmica está especialmente localizada entre 1900 y 1950 y en las dos últimas décadas del siglo XX.

En definitiva, la integración de los registros de temperaturas de más de tres mil estaciones repartidas por todo el mundo, ha permitido establecer la secuencia climática global entre los siglos XIX y XX, en tres fases:

- Un intenso calentamiento del clima en el periodo 1910-1945, con elevación media y global entre 0'4 °C y 0'6 °C.

- Un proceso de enfriamiento o palier en el aumento anterior que se produce entre 1946 y 1976.

- Desde finales de la década de 1970, se asiste a una nueva elevación de las temperaturas. Este calentamiento se ha registrado con una mayor intensidad que en la primera mitad del siglo XX. Así, durante el periodo 1976-2000, se ha registrado una anomalía positiva de 0'5 °C sobre la media de 1940-1975 (Figura 1). El aumento ha sido incluso más sensible a partir de 1990. De este modo durante la última década se han registrado nueve de los diez años más calurosos del siglo y el año 1998 parece ostentar el record de año más caluroso del milenio.

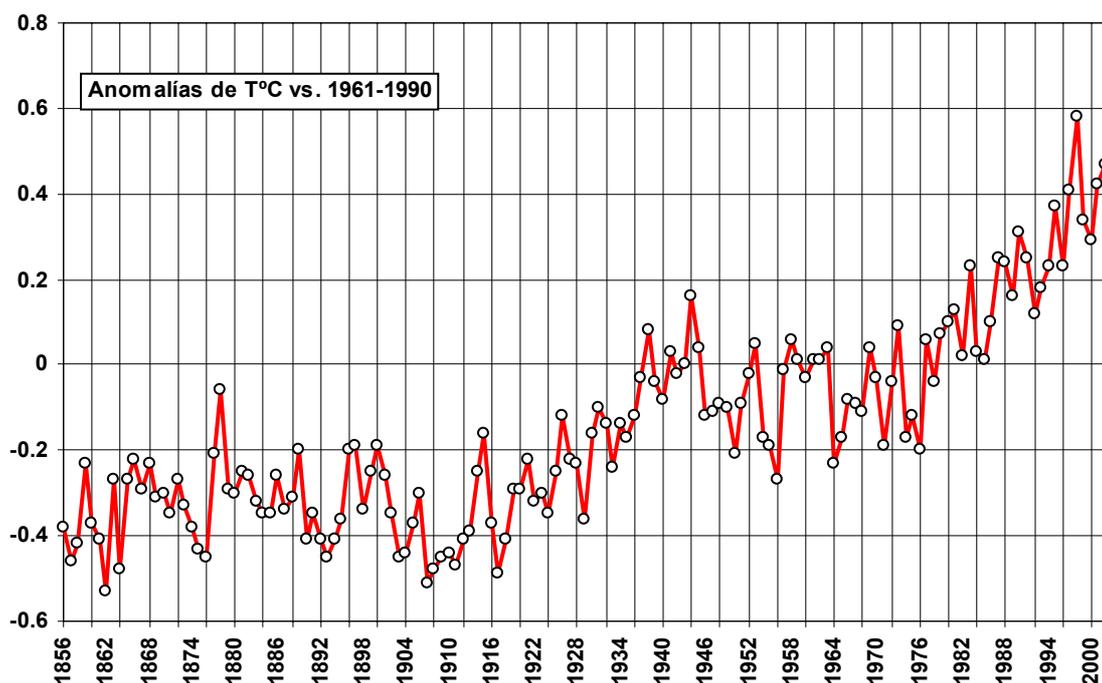


Figura 1. Evolución térmica global en anomalías con respecto a la media de 1961-1990. P. D. JONES et al., 1856-2002.

1.1. Las anomalías climáticas en el Mediterráneo.

La evolución térmica registrada en nuestra región mediterránea no parece corresponderse plenamente con la manifestada por la mayor parte de los observatorios mundiales desde fines del siglo XIX y a lo largo del siglo XX. Un hecho que no puede sorprender por cuanto que la misma serie global ha mostrado rectificaciones importantes a medida que se han ido incorporando observatorios y métodos (VINNIKOV, K.Ya, 1987). La región mediterránea española experimenta dos períodos con una sostenida elevación de las temperaturas, la primera va desde 1942 hasta 1970, siendo la fase en la que se opera una mayor disfunción con los registros globales que, contrariamente, muestran un sensible enfriamiento. La segunda fase evolutiva se produce durante los últimos quince años con plena coincidencia de calentamiento con la serie global. Entre ambas fases de calentamiento se sitúa el sensible palier de enfriamiento que transcurre entre 1971 y 1981. En este segundo y actual período de calentamiento, la temperatura media anual de los observatorios mediterráneos españoles, 17,7 °C, muestra un incremento de 0,5 °C con respecto a la media de las cuatro décadas anteriores 1941-1980 (Figura 2).

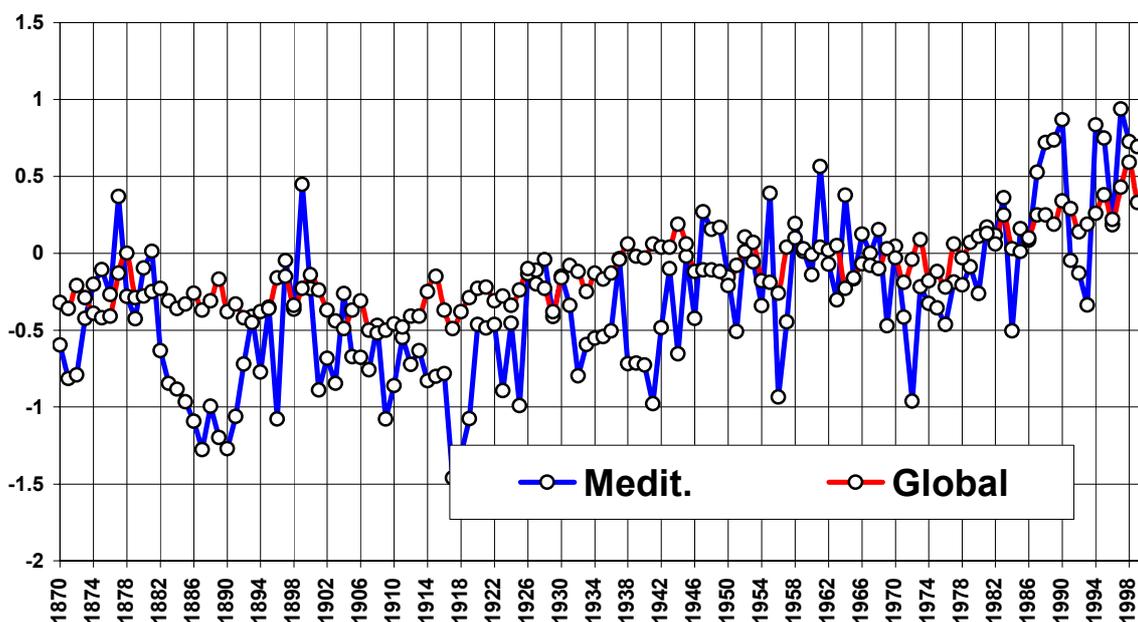


Figura 2. La evolución térmica mediterránea comparada con la global, anomalías con respecto al período 1960-1990 (1870-2000). La media mediterránea corresponde a los 12 observatorios de primer orden de todas las capitales de provincia de la región mediterránea española.

Ésta es precisamente la anomalía más importante que se ha venido registrando en el clima mediterráneo actual. Desde 1985 hasta el último año de 2000 ha transcurrido el

periodo más caluroso del siglo XX. A lo largo del mismo y sobre el litoral mediterráneo español se han registrado nueve de los diez años más cálidos desde 1870, siendo 1997 junto a 1990 y 1994 los récords térmicos.

De este modo, como eje de todas las anomalías climáticas registradas, el calentamiento climático del globo, se ha convertido en uno de los mayores retos científicos actuales. En consecuencia y dado que en la naturaleza y especialmente en el sistema climático todo aparece gobernado por lo térmico, las cuestiones claves que se plantean son dos: ¿Está cambiando el clima actual? y ¿Cual será la nueva readaptación bioclimática del globo?. Éstas son las inquietudes presentes. Unas inquietudes y exigencias acrecentadas con el desarrollo demográfico y económico modernos y que han planteado un auténtico reto investigador en los momentos en que las hipótesis sobre un cambio climático, simultáneamente a la elevación global de las temperaturas, proyectan sensibles alteraciones de los regímenes pluviométricos y de los recursos hídricos.

De este modo, la búsqueda de un modelo climático para los albores del siglo XXI, que integre todas las anomalías observadas, se ha convertido en uno de los mayores retos científicos actuales. Un reto ciertamente complejo, por cuanto que el clima se engendra en el seno de un colosal sistema regido por factores astronómicos, atmosféricos y geográficos en interacción constante, sin modelo mínimo alguno capaz de reproducir las relaciones más elementales. Y por ello un reto en el que todo cuanto se pueda decir y modelizar hacia el futuro, podría estar sujeto a graves errores si no se parte de nuestros actuales conocimientos sobre las circulaciones atmosféricas general y regional, así como de sus manifestaciones en la climatología pasada y presente.

II. La contaminación atmosférica y el efecto de invernadero.

Tales procesos estarían siendo producidos por el crecimiento de algunas sustancias gaseosas de la atmósfera que son transparentes a las radiaciones solares, principalmente de onda corta, pero que son, a su vez, opacas y muy infranqueables para las radiaciones de onda larga que irradia la superficie de nuestro planeta. Estas sustancias gaseosas vendrían a desempeñar un efecto semejante a una colosal manta sobre la superficie de nuestro planeta. Estas sustancias no aportan calor pero si evitan que éste se pierda hacia el espacio exterior (Figura 3).

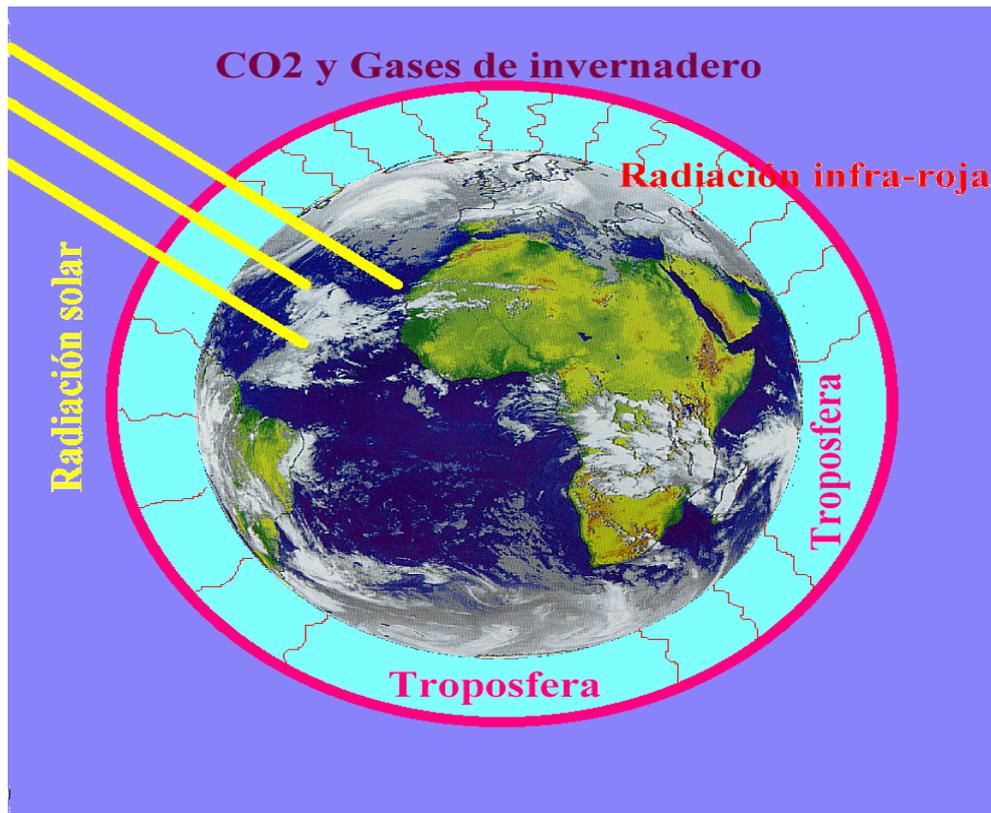


Figura 3. El diagrama atmosférico ilustra cómo el aumento en la concentración atmosférica de los denominados gases de invernadero acentúa el papel de válvula sobre las radiaciones solares incidentes en la superficie del Planeta.

Este efecto de pantalla o cierre atmosférico está constituido por la acción combinada de una larga serie de sustancias gaseosas. Las más determinantes en estos procesos son el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el ozono (O_3) y algunos de los denominados gases en estado de trazos, como el metano (CH_4) y los óxidos de nitrógeno (NO).

Consecuentemente a toda esta ingente concentración gaseosa, el equilibrio energético y térmico terrestre, puede alterarse con la variación cuantitativa de cualquiera de estos elementos y de todos los presentes en los intercambios que determinan el balance energético. Es precisamente en este campo donde las investigaciones actuales desprenden cambios de grandes consecuencias. En efecto, si hasta ahora la "vedette" del efecto invernadero ha sido el incremento en el CO_2 , comienza a percibirse la importancia, cuanto menos semejante, de los otros gases en estado de trazos, principalmente el protóxido de nitrógeno (NO), producido por la desnitrificación de los restos orgánicos en el suelo y el metano (CH_4). El metano es 21 veces más efectivo en el aumento de las temperaturas que la misma cantidad de CO_2 y el protóxido de

nitrógeno nada menos que 200 veces tan efectivo como el dióxido de carbono (A. LACIS, 1981). Una efectividad que se comprende pensando que estos gases vienen a ejercer su acción en la ventana irradiativa comprendida entre los 7'5 y los 12 μm . y a la que no llegan el CO_2 y el mismo vapor de agua.

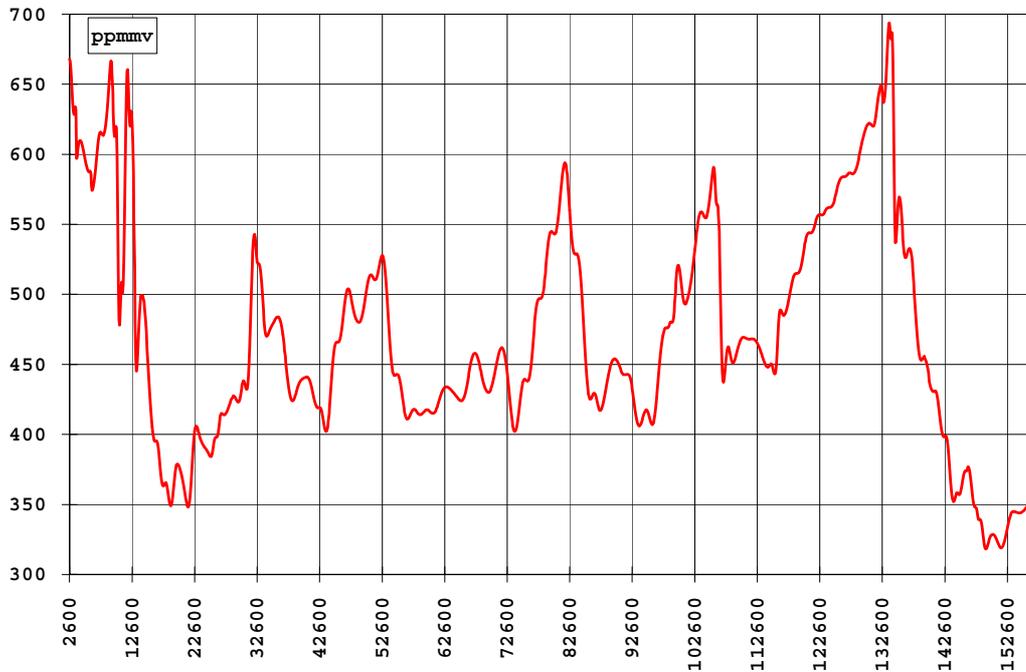


Figura 4: Evolución de la concentración atmosférica de CH_4 a partir de los datos del núcleo de hielo extraído en Vostok (2.600-157.300 B.P.). Fuentes: J. CHAPPELLAZ et al., 1994; y elaboración propia.

Todas estas investigaciones han proporcionado un mejor conocimiento de los procesos implicados. Recientes experiencias han revelado que ambos gases CH_4 y NO , disminuyeron sensiblemente durante la última glaciación (Figura 4) así como durante la denominada Pequeña Edad del Hielo (1450-1750). En los periodos cálidos, como el previsto para el futuro inmediato, esos gases se incrementarán. De ahí la importancia que adquiere su consideración en el "feedback" invernadero. Así, en el global calentamiento de la pasada centuria, el protóxido de nitrógeno se ha incrementado en un 20 % (M. A. K. KHALIL and R.A. RASMUSSEN, 1989).

Concluyentemente, los efectos climáticos asociados al incremento futuro de los gases NO y CH_4 son de magnitud, al menos comparable, a la de los causados por el

CO₂. Especialmente por sus tasas de crecimiento estimadas entre un 1'5 y un 3 % anual (I. S. A. ISAKSEN and O. HOV., 1987). La importancia decisiva de las concentraciones atmosféricas de todos estos GEIs o gases de efecto invernadero, ha planteado la necesidad de aproximar las tendencias de incremento de la futuras emisiones.

En cualquier caso, factor clave de todos esos efectos climáticos es la variación en las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono. Como "*vedette*" de tales procesos, la proyección futura del incremento atmosférico del CO₂, está recibiendo una inusitada atención.

Esta proyección de los niveles futuros del CO₂ presenta grandes incertidumbres. Por un lado exige conocer las posibles variaciones de los principales procesos de emisión ligados a la quema de combustibles fósiles y deforestación y, por otra parte, conocer la complejidad de los intercambios de carbono en el sistema atmósfera-océano-biosfera. Así pues, el mejor conocimiento de estas últimas interacciones permite estimar que la atmósfera podría ir equilibrándose con los restantes subsistemas. Ello impediría continuar en esos rápidos incrementos estimados (W. P. ELLIOT, 1983) y que duplicarían la actual concentración de CO₂ entre los años 2025-2030.

II. 1. Fuentes y sumideros del CO₂.

Este gas se produce e inyecta en la atmósfera por la acción de los organismos vivos de la tierra y de los mares, la descomposición de los elementos orgánicos del suelo y la quema de combustibles fósiles en los procesos industriales y domésticos. Simultáneamente, y a fin de mantener un equilibrio en la cantidad de este gas atmosférico de tan trascendental importancia para la vida de los seres y la temperatura del planeta, actúan dos procesos que eliminan dióxido de carbono de nuestra atmósfera: absorción de la hidrosfera y la fotosíntesis vegetal (Figura 5).

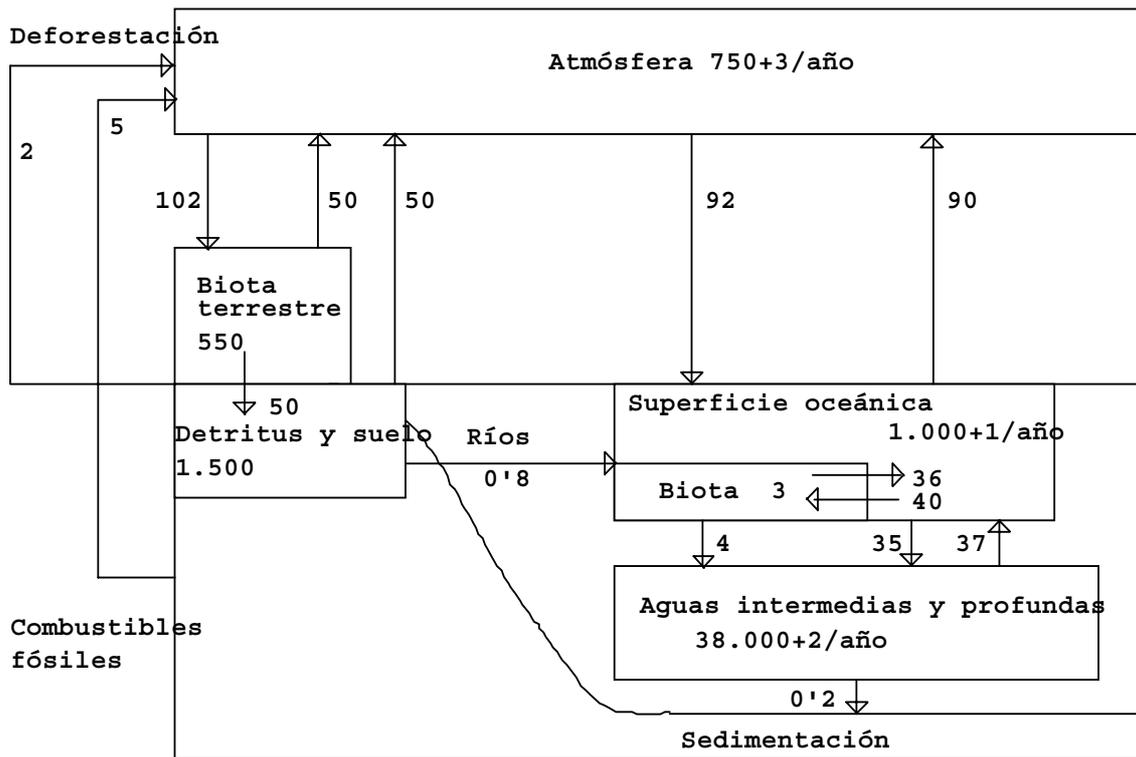


Figura 5. Reservorios globales de carbono (Gigatoneladas de carbono= 10^{15} gramos) y flujos anuales netos. Fuente: IPCC 1990, en N. K. TAYLOR, 1992).

El primero es la absorción ejercida por los océanos y mares, en los que el carbono es empleado en la formación del CaCO_3 de las conchas y caparazones de los animales marinos. El otro sumidero o consumidor de gas carbónico es el proceso de la fotosíntesis vegetal. Este proceso permite captar la energía luminosa solar mediante la clorofila para la elaboración o sintetización de las sustancias más o menos complejas y constitutivas de los tejidos vegetales. La función clorofílica absorbe así el anhídrido carbónico del aire, indispensable para la vida de las plantas. El carbono viene a representar un 50 % de la materia seca vegetal. Así, en el ámbito de la biosfera, la regulación del CO_2 viene efectuada por las plantas cuya velocidad de fotosíntesis es mayor que la de su respiración. Este último proceso es la función vegetal que durante la noche, sin fotosíntesis, sustituye a la función clorofílica y devuelve CO_2 a la atmósfera.

De este modo, la actuación de ambos procesos, absorción hidrosférica y clorofílica, ha determinado que desde hace 3.000 millones de años, la concentración atmosférica de CO_2 se haya mantenido estable y en niveles adecuados para la vida animal y vegetal. Ni ha sido demasiado alta como para elevar notablemente las

temperaturas ni demasiado baja como para impedir el crecimiento de las plantas (J. LABEYRIE, 1987).

En los momentos actuales y dentro de la dificultad para establecer balances, parece existir un cierto predominio de las fuentes de CO₂ sobre los sumideros, de modo que las 750 Gt C (millones de Tm) que almacena la atmósfera se incrementan en 3 Gt más cada año. Éllo viene basado en el crecimiento de la concentración atmosférica de CO₂ que revelan los registros del siglo XX. Utilizando datos del IPCC 1990 (N. K. TAYLOR, 1992), la mayor aportación viene representada por la respiración y descomposición de los organismos: el sistema biótico terrestre emite a la atmósfera 50 Gt C, las mismas que lanza el suelo y su detritus. A 90 Gt C, se eleva la cantidad emitida por la superficie oceánica. A esta aportación viene a añadirse la de la quema de combustibles fósiles, carbón, petróleo y gas natural, unas 5 Gt C, quedando 2 Gt para la deforestación y un porcentaje escaso para la aportación de volcanes y erosión de rocas conteniendo carbono (C). De estos 197 Gt C anuales de emisión carbónica, 102 Gt son eliminadas por el sistema biótico terrestre y 92 Gt por la superficie oceánica, permaneciendo las 3 Gt C restantes como una fracción contaminante de incremento en las concentraciones atmosféricas del CO₂.

No obstante, la distribución porcentual entre el sistema biótico y los océanos en torno a esa absorción no se conocen con exactitud. El sumidero oceánico y marino está recibiendo una considerable importancia en las investigaciones actuales. Especialmente en los mares fríos de las latitudes polares y subpolares, el bajo nivel de saturación en CO₂ de las aguas superficiales actúa con gran eficacia en la toma de carbono atmosférico. De modo más débil se efectúa esta absorción de CO₂ atmosférico en los océanos y mares de la zona templada y tropical. Globalmente, la capacidad oceánica de fijar carbono de la atmósfera había sido estimada en valores altísimos, pero los datos más recientes limitan su potencia (P. P. TANS et al., 1990, en N. K. TAYLOR, 1992).

La incertidumbre es muy grande en las cifras y estimaciones cuantitativas empleadas. A medida que prosiguen las investigaciones se descubren nuevas fuentes y sumideros hasta ahora subestimados. Baste considerar que tan solo en un periodo de actividad del volcán Etna, las fumarolas pueden inyectar en la atmósfera cerca de 10.000 Tm de C/día (J. LABEYRIE, 1987). Igualmente, en el medio oceánico, el

fenómeno de El Niño de 1982-1983, inyectó más de 1.600 millones de Tm de C en la atmósfera (A. GAUDRY et al., 1987).

Precisamente, el mejor conocimiento de todas las interacciones entre fuentes y sumideros, especialmente sobre la vedette de los GEIs, el CO₂, va permitiendo estimar que la atmósfera podría ir equilibrándose con los restantes subsistemas. Ello impediría continuar en esos rápidos incrementos estimados (W. P. ELLIOTT, 1983) según los cuales la actual concentración de CO₂ se duplicaría entre los años 2025-2030. Así, Marland y Rotty (W. P. ELLIOTT, 1983) afirman que esta duplicación se hubiese conseguido ya efectivamente, de no haber acontecido las grandes guerras mundiales y las depresiones económicas que han interrumpido ese 4'3 % de incremento anual en las *emisiones de CO₂* de gran parte del periodo industrial. En los momentos bélicos y de crisis ese crecimiento bajó a valores del 2'6 %. Incluso a comienzos de la actual década de 1990 se había reducido pasando a valores negativos. Sin embargo, las tasas se han recuperado en los años siguientes.

No obstante, se ha estimado también que ese crecimiento del 4'3 % era imposible de mantener sin los conflictos bélicos y crisis de desarrollo, ya que antes se habrían agotado las reservas mundiales de petróleo. De este modo, un crecimiento anual del 4-5 % en las emisiones no tiene fundamento científico para mantenerse (W. P. ELLIOTT, 1983).

En este sentido, modelos recientes mantienen la creíble opinión de que puede existir un límite de crecimiento del CO₂ entre 400 y 500 ppm (L. D. DANNI HARVEY, 1989). Esa estabilización se alcanzaría reduciendo a la mitad el valor de las emisiones actuales. De este modo, si las emisiones de combustibles fósiles decrecieran en el 1 ó 2 % anual a partir del 2001, los niveles de CO₂ podrían estabilizarse en esas 400-500 ppm, dentro de 50 ó 100 años. El proceso reductor podría ser incluso más intenso si además del papel absorbente del océano pudiesen declinar las emisiones de combustibles fósiles y las deforestaciones. Acciones éstas últimas que, en el momento actual, suscitan las mayores preocupaciones. Tan sólo la deforestación tropical ha sido evaluada en 11'1 millones de hectáreas anuales (A. HENDERSON SELLERS and V. GORNITZ, 1984). Deforestación que supone un equivalente de producción de 0'7 Gt anuales de carbono dentro de una producción mundial que se elevó a 6.6 Gt en 1997.

Estas hipótesis de disminución del gas carbónico por la reducción en el empleo de combustibles fósiles es, sin embargo, muy verosímil. Así, a niveles regionales, ya desde la crisis petrolífera de 1973-1979, se observó un descenso de las emisiones de CO₂ tras dos décadas de crecimiento continuo. Esta reducción ha alcanzado valores entre un 8 y un 11 % en Norteamérica y Europa Occidental en las dos últimas décadas del siglo XX. Sin embargo, la atmósfera no ha podido acusarlo sensiblemente, por cuanto que la contrapartida de los países subdesarrollados y de economía planificada ha supuesto un incremento de las emisiones de un 4 % acumulativo anual (G. MARLAND and R. M. ROTTY, 1984). En ello se refleja la dinámica de unos países que están buscando desesperadamente poder cubrir las necesidades de una creciente población (Figura 6). De este modo la moderación en los últimos años de las emisiones por combustibles fósiles, que pasa de un incremento de + 4'1 % (1951-1980) a otro de 1'5 % (1981-2000), no se ha traducido en la tasa de incremento del CO₂ que desde la década de los 80 alcanza su promedio decenal más elevado, 0'44 %/año.

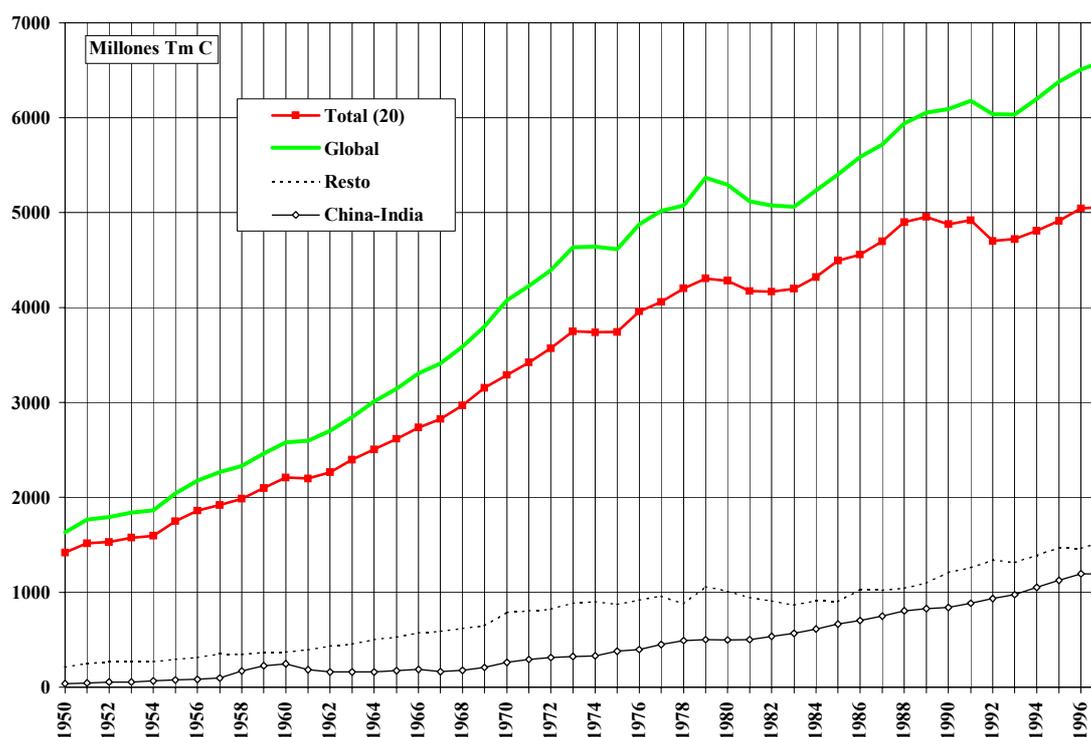


Figura 6. Evolución reciente de las emisiones industriales de CO₂ con especial atención al total representando por los veinte principales emisores del planeta, un buen porcentaje del global mundial. Fuente: G. MARLAND, T. A. BODEN and R. J. ANDRES, 2000 y elaboración propia.

Estos datos son especialmente relevantes tras las recientes Conferencias sobre Medioambiente y Desarrollo celebradas en Río de Janeiro, en 1992, y Berlín, en 1995. En las mismas, los porcentajes de reducción en las emisiones de CO₂ eran uno de los argumentos fundamentales de discusión. Tras la Conferencia de Río surge el documento conocido como "*United Nations Framework Convention on Climate Change*" (UNFCCC). Su objetivo a medio plazo era la estabilización de las emisiones de CO₂ y otros gases invernadero en los niveles de 1990 a finales de siglo (G. R. BIGG, 1993). La Declaración en la primera sesión de la UNFCCC, en Berlín, insiste en el objetivo de estabilizar las emisiones en los niveles de 1990 para la fecha de 2000. A su vez, hace referencia a la diferente responsabilidad de los países en desarrollo y aquellos desarrollados, estos últimos causantes de un buen porcentaje de las emisiones. En ese sentido, se plantea ya la reducción, para el 2005, de las emisiones al 20 % de los niveles de 1990, el llamado objetivo Toronto. Este punto recoge la postura de la "*Alliance of Small Island States*" (AOSIS), 36 países amenazados por el ascenso del nivel marino.

Con todas estas incertidumbres, la proyección de la futuras emisiones ha sido llevada a cabo en el seno del IPCC en el Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Incertidumbres que han obligado a establecer diversos escenarios de aumento térmico como respuesta a las distintas tasas de incremento futuro de los GEIs contempladas (Fig. 7).

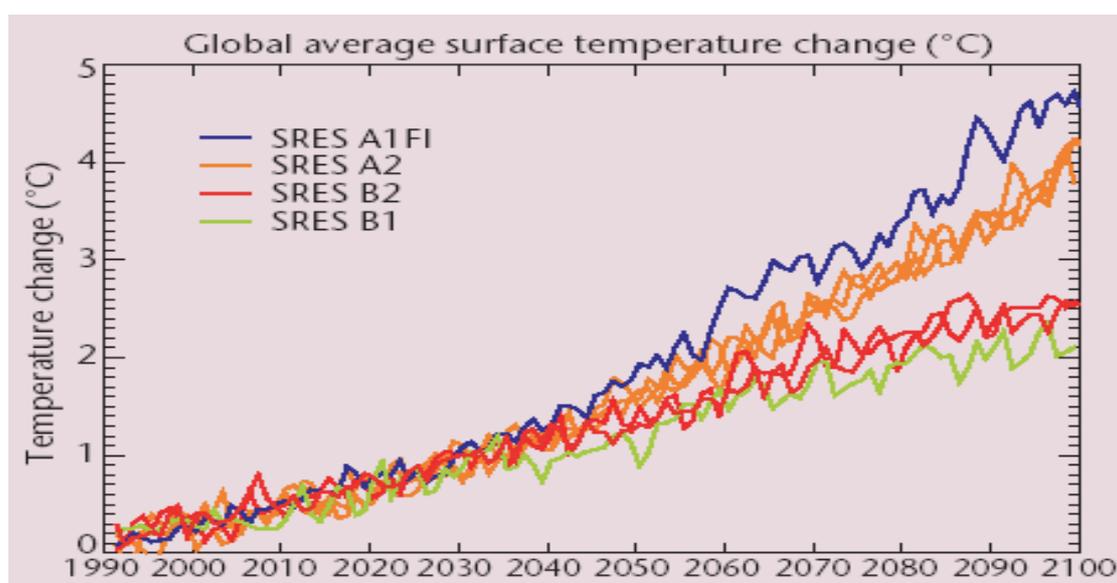


Fig. 7. Evolución simulada de la temperatura media global entre 1990 y 2100 mediante el modelo cerrado atmosfera-océano del Hadley Center. La proyección está

basada en los escenarios de los GEIs previstos (SRES) y las diferencias de evolución responden a las diferentes condiciones iniciales.

Las integraciones mejor aceptadas de todos estos factores han conducido a aceptar la teoría del denominado efecto invernadero. En efecto, la estrecha relación entre la sensibilidad de las temperaturas y los gases de efecto invernadero, especialmente el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄) con correlaciones próximas a $r = 0.8$ aparece desde tiempos glaciales. El mismo comportamiento de los elementos climáticos, especialmente de las temperaturas, a lo largo de las últimas dos décadas así lo estaría corroborando. Especialmente se detectaría en el aumento térmico que viene registrándose en las anomalías térmicas mundiales y regionales.

Los resultados de las investigaciones actuales parecen coincidir así en que nos hallamos ante los primeros síntomas de un calentamiento general del clima, si bien con oscilaciones anuales debidas a la actividad volcánica o a los efectos de la nubosidad. A pesar de ellas, en estas dos últimas décadas del siglo XX se vienen registrando los años más calurosos del presente siglo y con varios récords térmicos. Incluso la O.M.M. se atrevía a vaticinar, con un mes de antelación al final del 2000, que había sido el más caluroso del siglo, hecho que no sucedió.

Sin ignorar las grandes incertidumbres que una integración de tan complejos procesos plantea, se admite que el incremento atmosférico del CO₂, vapor de agua y restantes gases en estado de trazos, producido por el empleo de combustibles fósiles, la deforestación y la desnitrificación de los residuos orgánicos, parece conducir a un incremento general de las temperaturas mundiales a causa del efecto invernadero. Los modelos desarrollados apuntan a que ese calentamiento elevaría las temperaturas globales entre 1 y 1.5 °C a mediados del siglo XXI y de entre 2° C y 5.5 °C a finales del mismo.

II.2. Los modelos climáticos globales y sus incertidumbres.

Consecuentemente, y dentro de ese escenario global o planetario, la cuestión es: ¿Qué clima cabe esperar a nuestra región mediterránea a lo largo de la primera mitad del siglo XXI? Y, más precisamente, ¿Cuál va a ser el escenario climático sobre las tierras de la Región de Murcia? Una cuestión a la que el desarrollo de los modelos globales de la circulación (CGMs) han venido aportando aproximaciones interesantes aunque muy

inseguras. La principal debilidad de los mismos reside en nuestra insuficiente comprensión del Sistema Climático.

En este orden de conocimientos, hoy está claramente establecido que el conjunto de la atmósfera, la hidrosfera y la litosfera-cryosfera, constituye una gigantesca máquina térmica funcionando entre las fuentes cálida y fría asociadas respectivamente a la radiación solar y a la irradiación de la tierra hacia el espacio. De este modo, los balances medios netos entre ambos procesos determinan que los océanos de las bajas latitudes reciban calor en exceso, pero que a partir de los 35 grados, comiencen a producirse balances negativos y pérdidas de calor. De ello resulta una transferencia térmica meridiana que juega un papel esencial en la máquina climática y donde la circulación de las regiones intertropicales, situada en la fuente cálida del sistema, es la responsable de la transferencia (T.H. VONDER HAAR and A.H. OORT, 1973).

En consecuencia, la variabilidad climática a corto plazo puede ser considerada como una resultante en la autovariación del sistema cerrado océano-atmósfera al margen de todas las acciones exteriores a este sistema. Así, en esta escala y en el concepto del sistema climático reducido a los dos únicos medios oceánico y atmosférico, el océano constituye una fuente potencial de variabilidad muy importante.

Las transferencias de energía entre la atmósfera y los océanos son un factor determinante en el equilibrio y las variaciones del clima. En este sentido, es posible destacar que entre las adquisiciones más significativas hechas por la ciencia meteorológica en el transcurso de los últimos veinte años, se puede situar la mejor comprensión de la influencia determinante que los intercambios aire-mar ejercen sobre la dinámica y la termodinámica de la atmósfera y, en consecuencia, sobre el clima.

Extendiéndose sobre las tres cuartas partes de la superficie del globo, pudiendo almacenar, para una duración más ó menos prolongada, considerables cantidades de energía, capaces de transportar esa energía sobre millares de kilómetros y asegurando en su superficie lo esencial del mecanismo de evaporación con transformación del calor sensible en calor latente, los océanos juegan un papel central y complejo dentro de los procesos energéticos globales y regionales. Y es precisamente en este dominio de las interacciones atmósfera-mar donde se suscitan las mayores incertidumbres y muy especialmente en el papel del vapor de agua, el principal componente energético de la atmósfera y a la vez el más intenso de los GEIs.

Energía y agua son los ingredientes clave de nuestro sistema de tiempo y clima. Ambos están intrínsecamente y complejamente unidos en su transporte y transformación a los procesos esenciales del tiempo y del clima. De tal modo que, las principales características de tiempo y clima están determinadas por las interacciones de agua y energía, los más importantes recursos y elementos atmosféricos que impactan sobre el hombre. Paradójicamente nuestro actual conocimiento de los ciclos globales y regionales de esos elementos es muy pobre. De ahí que hayan constituido uno de los principales objetivos del *Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX)*. Actualmente puede considerarse que mientras el balance energético está caracterizado por importantes intercambios radiativos con el espacio, la Tierra es un sistema cerrado con respecto al agua. La irradiación media en la cima de la atmósfera es de 345 W/m^2 . Las principales fuentes de energía para la atmósfera son de 65 W/m^2 por absorción de la energía solar y de 80 W/m^2 debido a la evaporación y subsiguiente condensación. Simultáneamente, más de la mitad de la energía que la superficie terrestre pierde es a través de la evaporación del agua. De este modo, el papel de agua y el vapor de agua son de gran importancia en la determinación de los balances energéticos.

Consecuentemente, la nubosidad es uno de los más importantes elementos del tiempo. Sus efectos en el balance de radiación planetaria son, sin embargo, opuestos. Reflexión de energía solar y absorción de la misma se traducen respectivamente en enfriamiento y calentamiento. El resultado neto de esos efectos opuestos parece ser de un enfriamiento. A partir de las más recientes observaciones de satélites se puede estimar que, en cifra media global de efecto invernadero, la nubosidad proporciona un calentamiento de 30 W/m^2 , mientras que el albedo determina un enfriamiento de 45 a 50 W/m^2 (V. RAMANATHAN et al., 1989; en W. J. INGRAM, 1989).

No obstante, los procesos y efectos parecen ser más complejos y poco conocidos. En este sentido, puede señalarse la ignorancia sobre la retroalimentación de calor latente que la condensación engendra en la atmósfera. Asimismo y a estos efectos complejos se añaden las incertidumbres surgidas sobre las variaciones de nubosidad con el paso de un clima más fresco a otro más cálido. Así una de las primeras tentativas de modelización (E. C. BARRET, 1976) estimaba que con el paso a una Europa más cálida se produciría una disminución en la nubosidad.

Sin embargo más recientemente, (A. HENDERSON-SELLERS, 1986), los modelos cálidos empleados sugieren que, con excepción de algunas áreas en Europa Central, la

cantidad de nubes se incrementarían. Ello es explicado por dos razones. La primera es el incremento en la frecuencia de situaciones de bloqueo que conlleva el calentamiento del clima. Las depresiones asociadas serían más frecuentes sobre el área mediterránea. La segunda razón es el incremento de la convectividad aparejado a unos océanos y mares más cálidos y con mayor desarrollo de nubosidad.

Para añadir mayores incertidumbres, la respuesta de las nubes ante una duplicación del CO₂ ha sido simulada por los modelos de Circulación General del *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*, en Princeton (New Jersey); del *Goddard Institute of Space Sciences*, en Nueva York; y el *National Center for Atmospheric Research*, en Boulder, Colorado. Todos ellos coinciden en la reducción de las nubes medio-troposféricas, y en una mayor medida de aquellas de la troposfera superior.

La magnitud de los cambios expresada por cada modelo varía lo suficiente como para que el efecto neto de la nubosidad oscile desde una retroalimentación positiva a nula. El principal efecto sobre la radiación térmica deriva de los cambios en las nubes de la troposfera superior, ya que si éstas se desplazan hacia arriba y se enfrían, su efecto invernadero aumenta y nos encontramos con una retroalimentación positiva. La reducción de las nubes mediotroposféricas disminuiría el albedo planetario, dando, de nuevo, una retroalimentación positiva. La diferencia fundamental radica en la respuesta de las nubes bajas, que afectan, básicamente, al albedo planetario. Pueden incrementar lo suficiente como para que la reflexión extra de luz solar casi compense la retroalimentación positiva de las nubes altas, ó disminuir bastante como para añadir una nueva y potente retroalimentación positiva (W. J. INGRAM, 1989).

Lamentablemente, la importancia del agua atmosférica a través del sistema nuboso, adolece de medidas insuficientes y poco fiables. Las series de nubosidad obtenidas en los observatorios españoles mediante heliógrafos de Cambell Stokes, ofrecen tales contrastes y contradicciones entre estaciones vecinas que resulta infundada cualquier deducción sobre su efecto en las temperaturas.

III. Los escenarios climáticos previstos en los modelos de Cambio Climático Global (GCMs) para el siglo XXI.

Ante los incrementos estimados de las emisiones futuras de GEIs, los principales modelos de Circulación General disponibles coinciden en mantener el efecto

invernadero con un aumento paralelo de las temperaturas. Los factores geográficos, configuración terrestre, oceánica y cryosférica principalmente, vendrían a determinar las diferencias regionales y especialmente que este aumento térmico fuese más sensible en las altas y medias latitudes que en las bajas.

En esta hipótesis, más o menos comúnmente aceptada hoy, de una elevación general de las temperaturas, los efectos climáticos globales y ambientales presentan grandes incertidumbres. No obstante, el estudio llevado a cabo sobre el comportamiento de algunas estructuras de la Circulación General permite aventurar alguna hipótesis.

La más verosímil sería la fusión de una gran parte de la “*banquise*” ártica. Se estima, por los datos mareográficos existentes, que el nivel general de los océanos se ha elevado 9 cm en el presente siglo y ascendería 33 cm más a finales del siglo XXI. De este modo, la zona del Frente Polar podría migrar igualmente cuatro o cinco grados latitudinales hacia el norte (Figura 8). Su situación se dispondría sobre la faja de máximo contraste térmico, algo al sur de los inlandsis ártico y antártico y donde se originaría una mayor frecuencia de depresiones. Concomitantemente con este desplazamiento, se produciría el de las otras dos grandes estructuras atmosféricas: Anticiclones subtropicales y Célula de Hadley intertropical.

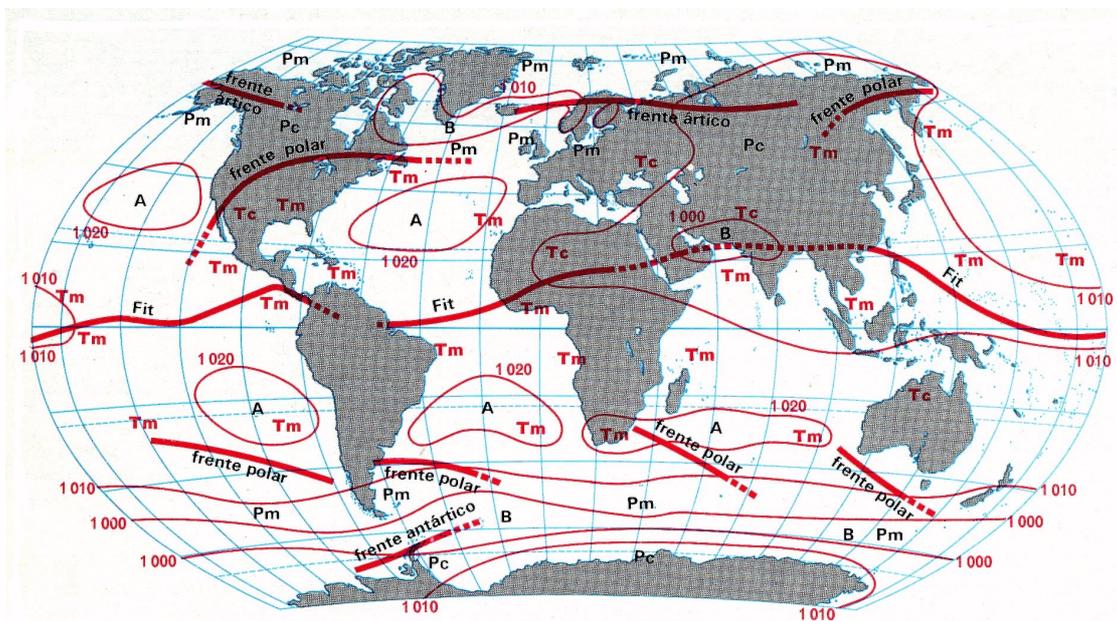


Figura 8. Las grandes estructuras atmosféricas de la Circulación General. La dilatación de la Célula de Hadley, la contracción del manantial ártico y el ascenso hacia el norte de las grandes estructuras atmosféricas, determinaría que la Península Ibérica y especialmente el sector mediterráneo sur quedara alejado de la zona neurálgica donde se gestan las precipitaciones e irrupciones de aire frío.

De acuerdo a estos desplazamientos, la mayoría de los modelos globales predicen dos grandes impactos biogeográficos. El primero sería el notable incremento de la superficie de bosques (T. M. SMITH et al., 1992) en la zona tropical y especialmente en las zonas subpolares, donde el calentamiento de la tundra actual dejaría paso a los bosques de coníferas. Sabido es que el bosque exige que al menos un mes tenga 10'5 °C, límite que ascendería en latitud notablemente con idéntica reducción de albedos. *El segundo gran impacto biogeográfico sería la reducción de recursos hídricos en la zona latitudinal 37-47° del Hemisferio Norte.* Este déficit está recibiendo una considerable atención por cuanto que en esta faja meridional de la zona templada, en la actualidad ya con caudales muy ajustados, es el área de mayor aptitud agrícola (N. J. ROSENBERG, 1982) (Figura 9). Una zona en cuyo límite meridional se halla la Región de Murcia.

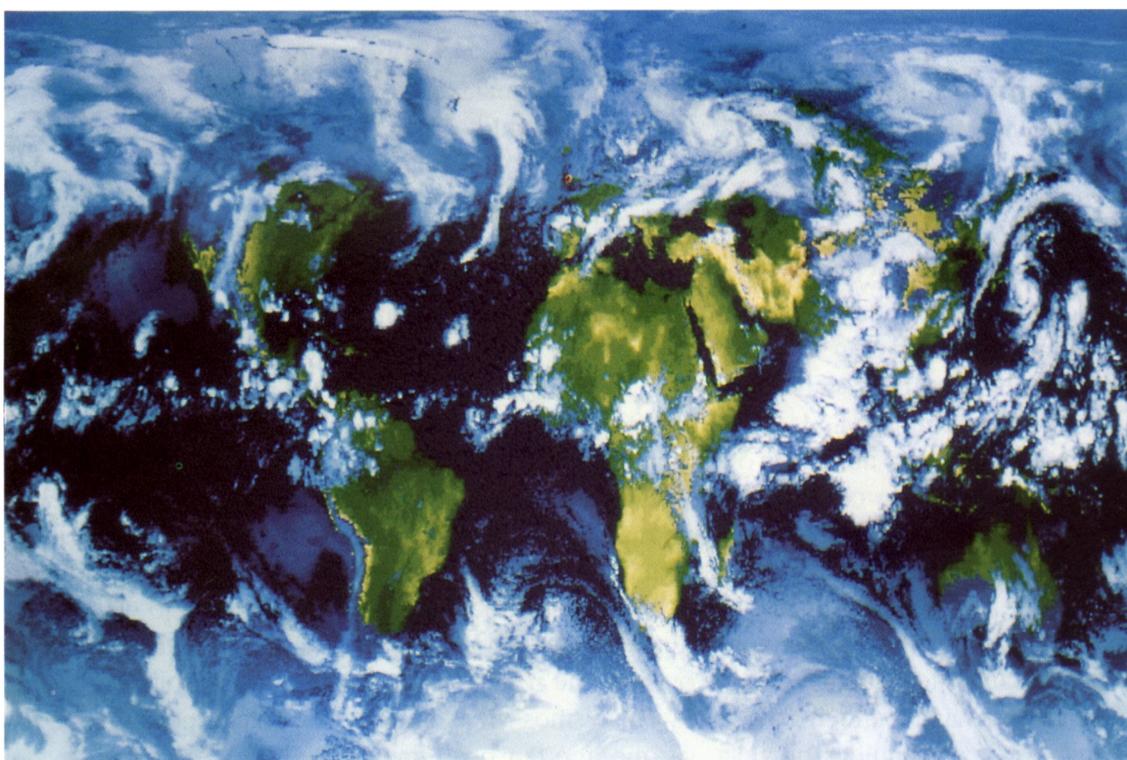


Figura 9. La imagen global multisatélite del día 20 de agosto de 1993, permite ilustrar el juego de las estructuras atmosféricas en un modelo de calentamiento climático. Resultan expresivas las células de Hadley y las áreas anticiclónicas de subsidencia, así cómo las zonas neurálgicas del Frente Polar.

Consecuentemente con estos procesos la Península Ibérica y especialmente la Región de Murcia se hallarían sensiblemente afectadas en estas modificaciones de la Circulación General de la Atmósfera. Así un calentamiento general de la zona entre 1'5 °C y 2° C, como el previsto en la mayor parte de los modelos para el año 2050, podría

suponer que la célula subtropical de altas presiones de Azores se desplazase latitudinalmente desde los 37° N de su posición media actual hasta los 41-42° N. Ello podría implicar una reducción considerable del régimen pluviométrico asociado a las borrascas del Frente Polar, así como de las irrupciones de aire frío. Simultáneamente, la elevación de las temperaturas podría provocar un aumento de las evaporaciones y un menor rendimiento de los recursos hídricos, fruto de las advecciones de masas aéreas africanas.

Con ello se asistiría a una reducción del área actualmente ocupada por el bosque o tapiz forestal templado cálido que asciende en latitud hacia la faja central de Europa, a favor de la vegetación tropical seca. Todo ello simultáneamente a la desaparición del bosque húmedo boreal que actualmente cubre la denominada España húmeda y que tan sólo en las partes altas del Pirineo vería aparecer espacios vegetales más propios del bosque templado fresco.

No obstante y dentro de esta faja de reducción de recursos hídricos, toda la Cuenca Occidental del Mediterráneo y, en su vertiente continental, las tierras de la Región de Murcia asistirían a un cambio de escenario climático en dos fases, progresivas y paralelas al aumento térmico. En la primera de éstas, aproximadamente hasta el año 2025, con un aumento térmico inferior a 1 °C, el clima sería más seco. Una sequía basada no tanto en la disminución de las precipitaciones como en el aumento de la evapotranspiración potencial (ETP) en unos 25-50 mm/año (N. A. EFIMOVA, 1987). En una segunda fase, y paralelamente a la intensificación de los procesos convectivos, el clima acentuaría la sequedad así como la irregularidad del régimen pluviométrico, continuando en la disminución de recursos hídricos.

En síntesis, la Región de Murcia así como toda la Región Mediterránea, en el borde meridional de la zona templada, entre los 35° N y los 45° N, podría estar abocada a experimentar impactos climáticos y biogeográficos de gran intensidad. En consecuencia, a lo largo del siglo XXI, se podría asistir a una sensible readaptación de su escenario biogeográfico. Éste, no sólo se vería afectado por el aumento general de las temperaturas sino que muy especialmente asistiría a una sensible reducción de sus recursos hídricos tanto por la disminución de precipitaciones (10-15%) como por el aumento de las evapotranspiraciones (50 mm). Incluso algunos modelos llegan a cifrar la disminución en valores del 20-25 % en el transcurso de los próximos 50 años (M. L. PARRY et al., 1999).

Esta reducción de los recursos pluviométricos, así como su previsión, constituye hoy uno de los principales desafíos de la climatología mediterránea. La disminución de las lluvias, unida al aumento de las evapotranspiraciones, vendría a agravar la situación de los recursos hídricos y las condiciones de la sequía de toda la región mediterránea en la que la Región de Murcia ocupa un lugar central. Unos impactos que necesariamente se han tratado de prever en el Libro Blanco del Agua del agua como unos poderosos condicionantes de las reservas hídricas a estimar en el actual Plan Hidrológico Nacional.

III.1. La planificación hidráulica.

La planificación hidráulica española, ante la falta de modelos climáticos suficientemente detallados que permitan proyectar los efectos sobre el ciclo hidrológico, ha adoptado dos posibles escenarios climáticos para proyectar el impacto que sobre las escorrentías podrían tener las alteraciones previstas de la temperatura, de la precipitación y de la consiguiente evapotranspiración potencial. Estos dos escenarios, sobre el fondo de una duplicación del CO₂ en el año 2030, son:

- 1) Un aumento de 1° C en la temperatura media anual y sin reducción de las precipitaciones.
- 2) Un aumento de 1 °C de la temperatura media anual y una reducción del 5 % en las precipitaciones.

La figura 10, es una expresión cartográfica de los efectos que sobre la escorrentía podría tener el primero de los escenarios. La Región de Murcia sufriría una reducción de entre el 10 y el 25 % de las actuales escorrentías. Una reducción que todavía podría ser mayor en las zonas litorales y regadíos del bajo Segura.

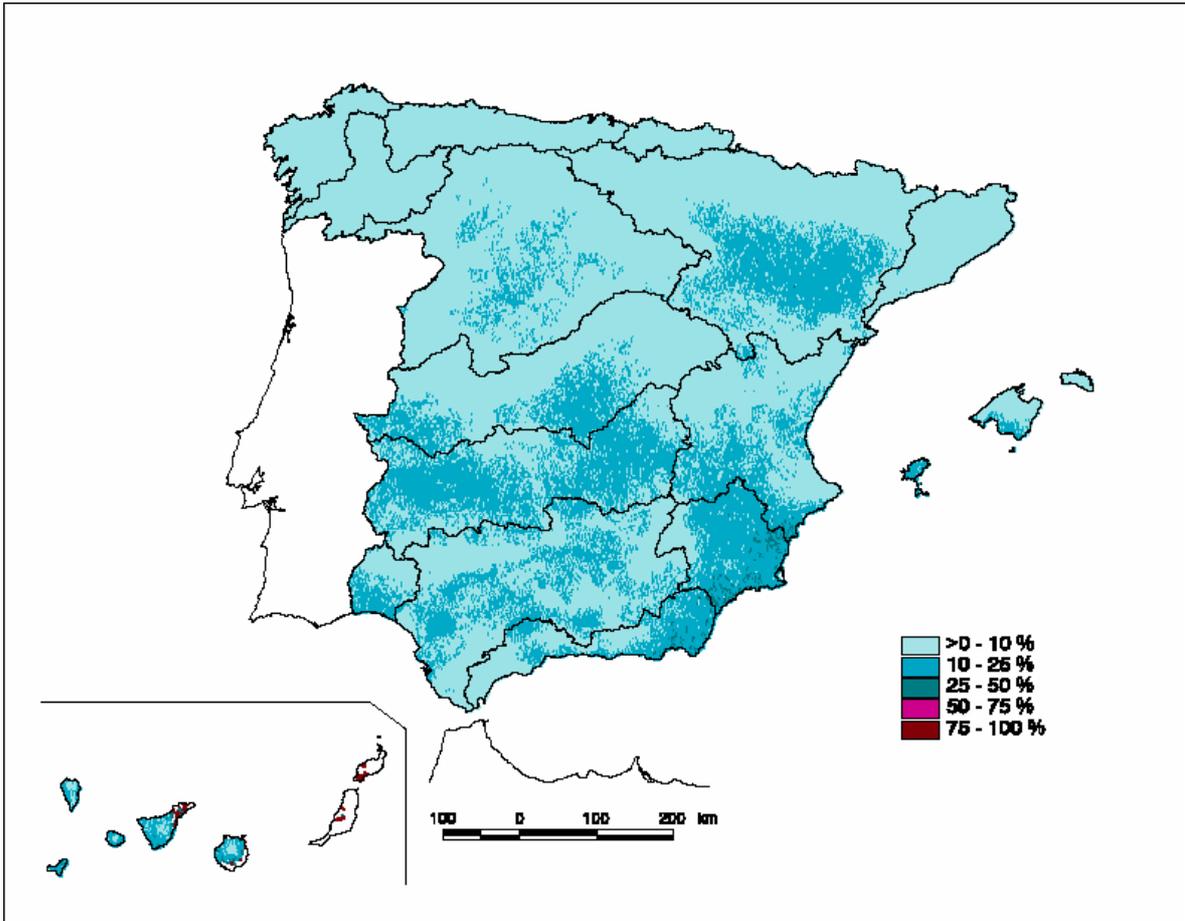


Figura 10. Libro Blanco del Agua. Escenario nº 1. Sobre la Región de Murcia se asistiría a una reducción de las escorrentías evaluable entre el 50 % de algunas zonas del Bajo segura y sector litoral y valores inferiores al 10% en las sierras del interior (Taibilla, Caravaca).

A pesar de la gravedad de esta reducción, este primer escenario puede ser calificado de moderado. Por ello se contempla un segundo escenario algo más severo y de mayor repercusión sobre los actuales déficits hídricos. Este segundo escenario estaría caracterizado por un aumento térmico de 1 °C con su repercusión sobre la ETP y una simultánea reducción de las precipitaciones en un 5 % (Figura 11). El impacto sobre las escorrentías determinaría una sensible reducción de las mismas con valores entre el 25 y el 50 % y algo inferiores en las tierras altas del interior (Altos Taibilla, Guadalentín y Mundo). Previsiones globalizadas sobre toda la Cuenca del Segura y en el horizonte del año 2060 con un 28 % de disminución de las escorrentías (J.AYALA, 2000).

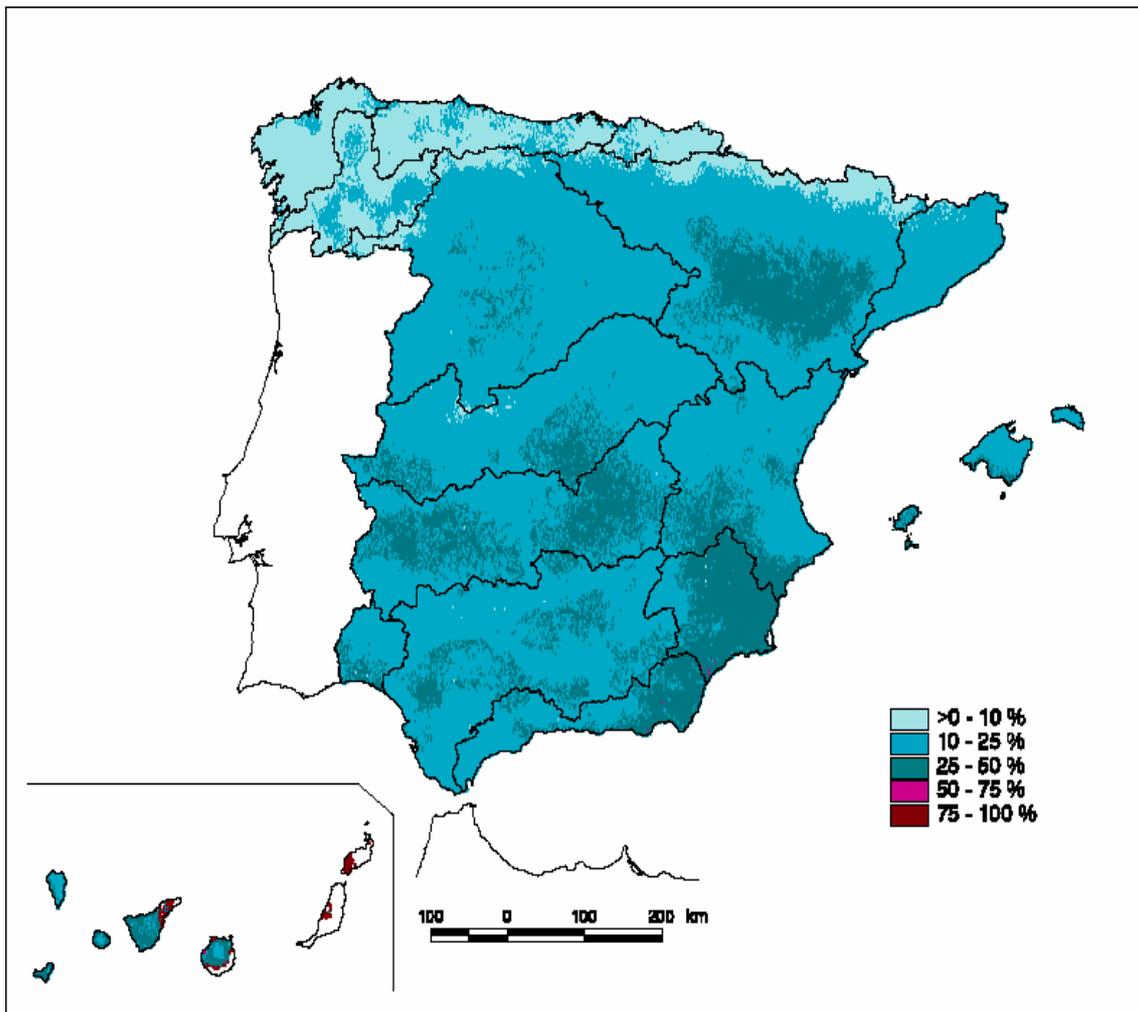


Figura 11. Libro Blanco del Agua. Escenario nº 2. Impacto sobre los recursos hídricos a través de la reducción de la escorrentía. La Región de Murcia podría sufrir una grave reducción de hasta el 50% en sus escorrentías.

III.2. Las previsiones del IPCC (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático) según modelos del Hadley Centre.

Este segundo escenario de la planificación hidráulica sobre la Cuenca del Segura se muestra ya más acorde con las bases del IPCC, Climate Change 2001. Las bases científicas de este último informe de las Naciones Unidas, establecidas en los modelos del Hadley Centre, establecen que el incremento global de la temperatura durante el siglo XX ha sido de $0.6\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Un incremento térmico que para el rango de escenarios desarrollado en el IPCC, Special Report on Emission Scenarios (SRES), va a suponer un calentamiento global entre $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ hacia el año 2100. Incrementos energéticos sobre los que los modelos desarrollados establecen un gradual aumento del nivel del mar entre 0.09 y 0.88 metros para el mismo año.

Estos mismos modelos, proyectados por el Hadley Centre, para un escenario de un incremento anual del 1 % en la concentración atmosférica del CO₂, predicen que nuestra región mediterránea será la más vulnerable de Europa a los efectos del cambio climático. Vulnerabilidad basada en que simultáneamente al aumento térmico de 2 ó 3 °C se produciría una reducción de recursos hídricos. El valor de la misma, en el modelo de tercera generación (HadCM3) podría alcanzar hasta un 33 % de las actuales magnitudes de escorrentía, ya de por sí escasas con valores medios anuales de 75 mm en las tierras valencianas y tan solo 50 mm en la Región de Murcia. Esta escorrentía total equivale a unos recursos hídricos naturales de 990 Hm³ año sobre la Cuenca del Segura y consecuentemente la reducción de un tercio de sus escorrentías tan solo dejaría unos recursos aproximados de 620 Hm³ año (Figura 12) con aumento de su déficit actual que ya alcanza los 450 Hm³ año.

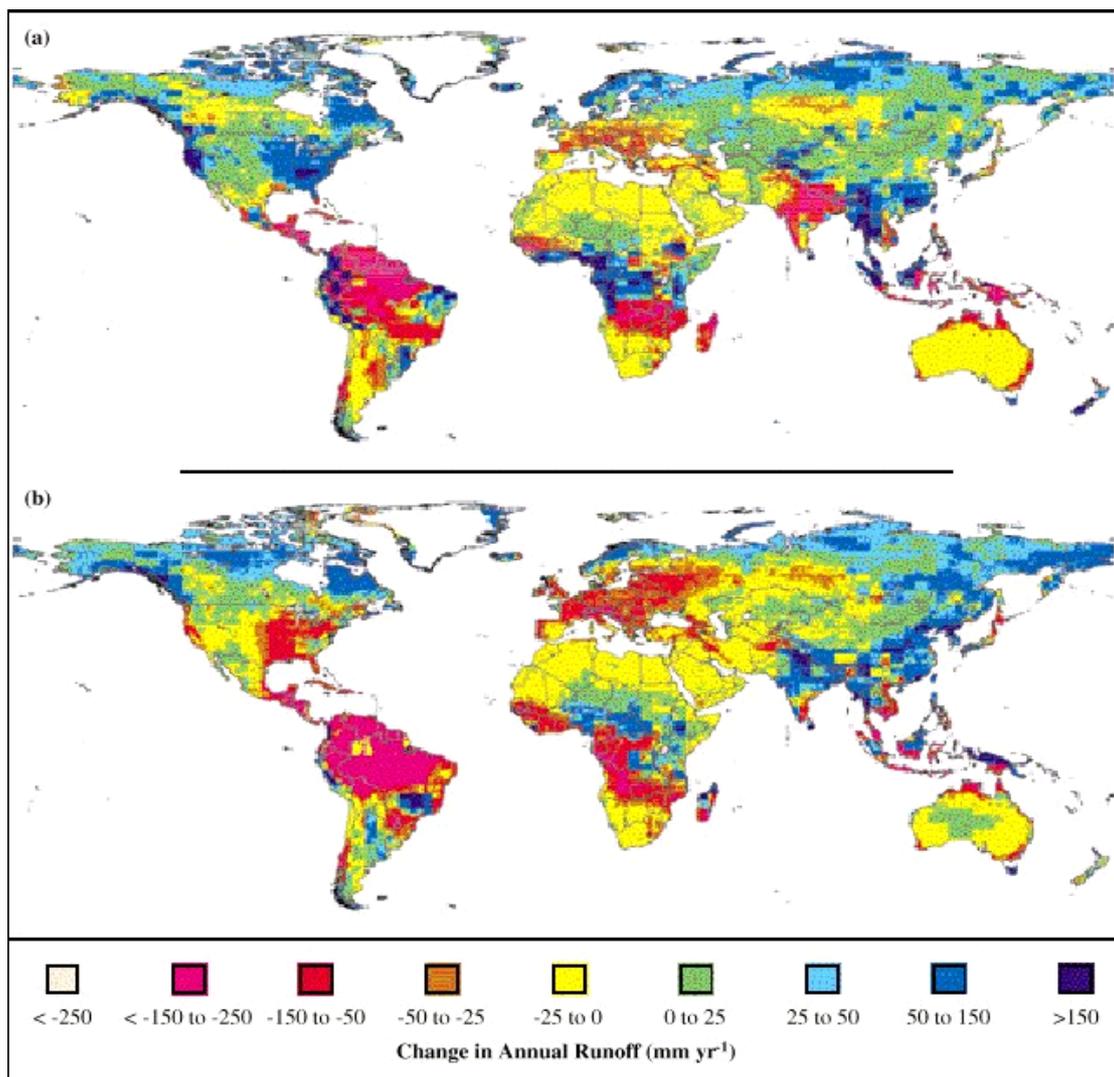


Figura 12. IPCC (2001). Escenarios climáticos previstos en la escorrentia del año 2050 como anomalías con respecto a la escorrentia promedio del período 1961-1990. Las proyecciones están efectuadas por medio de los modelos de segunda y tercera generación del Hadley Centre (HadCM2 y HadCM3).

Finalmente conviene reiterar las incertidumbres que los modelos de cambio climático global plantean a la hora de plasmarse sobre escenarios regionales. Ello ha llevado al propio Hadley Centre a desarrollar un modelo de Cambio Climático Regional (RCM) que permita proyectar con mayor precisión los cambios climáticos posibles a esa escala. Estos modelos tratan de interpolar información para que los procesos físicos con que se ejecuta el funcionamiento del Sistema Climático no estén referidos absolutamente a grandes superficies planas donde relieve e influencia marítima son ignoradas.

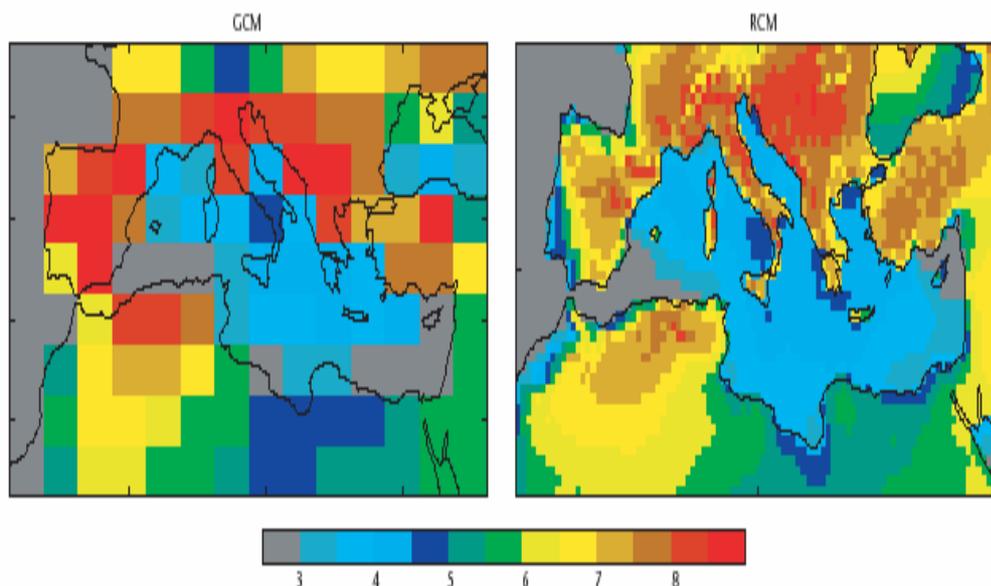


Figura 13. Aumento térmico (°C) estival previsto a final del siglo XXI por el GCM y el RCM.

La figura anterior (Figura 13) permite apreciar las mayores ventajas que presentan los modelos regionales de cambio climático (RCMs) en orden a estimar los potenciales impactos de la alteración del clima en ámbitos espaciales reducidos y donde relieve e influencia marina juegan un papel destacado. Para ello es preciso obtener una mayor escala a los productos de los modelos globales (GCMs). Esta es una de las tareas básicas de nuestro estudio sobre la Región de Murcia y esencialmente la que servirá para establecer el posible escenario climático regional en el horizonte del año 2030. Como hemos venido afirmando, esta proyección es un reto ciertamente complejo, por cuanto que el clima se engendra en el seno de un colosal sistema regido por factores astronómicos, atmosféricos y geográficos en interacción constante, sin modelo mínimo alguno capaz de reproducir con certeza las relaciones más elementales. Y por ello un reto en el que todo cuanto se pueda modelizar hacia el futuro, podría estar sujeto a graves errores si no se parte de nuestros actuales conocimientos sobre las circulaciones atmosféricas general y regional, así como de sus manifestaciones en la climatología pasada y presente que deben estar reflejando ya las tendencias futuras. Estos conocimientos sobre la climatología regional constituyen la otra tarea básica de nuestro trabajo.

IV. ¿Se detecta ya alguna señal climática en relación con ese escenario de aridez que los modelos de cambio climático han previsto sobre la Región de Murcia?

Ésta es propiamente la cuestión o reto científico. Hoy, más que nunca, es preciso volver a interrogarnos sobre alguna de las más inquietantes cuestiones que tiene ante sí la Climatología mediterránea: *¿Están ascendiendo las temperaturas?*, *¿Están disminuyendo las precipitaciones de la Región de Murcia?* No son otras las cuestiones claves u objetivos del presente informe.

Desde luego es evidente que si este escenario los dibujamos con el comportamiento climático de la última década, el aumento de las temperaturas y la sequía parece presidir nuestro porvenir. En efecto, la cúpula anticiclónica instalada y reforzada sobre la Cuenca Occidental del Mediterráneo entre 1980-1999, responde una mayor presencia de la masa de aire sahariana sobre nuestra región (Figura 14). Ello ha provocado que las corrientes atmosféricas de borrascas y lluvias se hayan desplazado más hacia el norte de Europa.

Anomalías de presión 1990s y 1980s respecto 1970s a 700 hPa

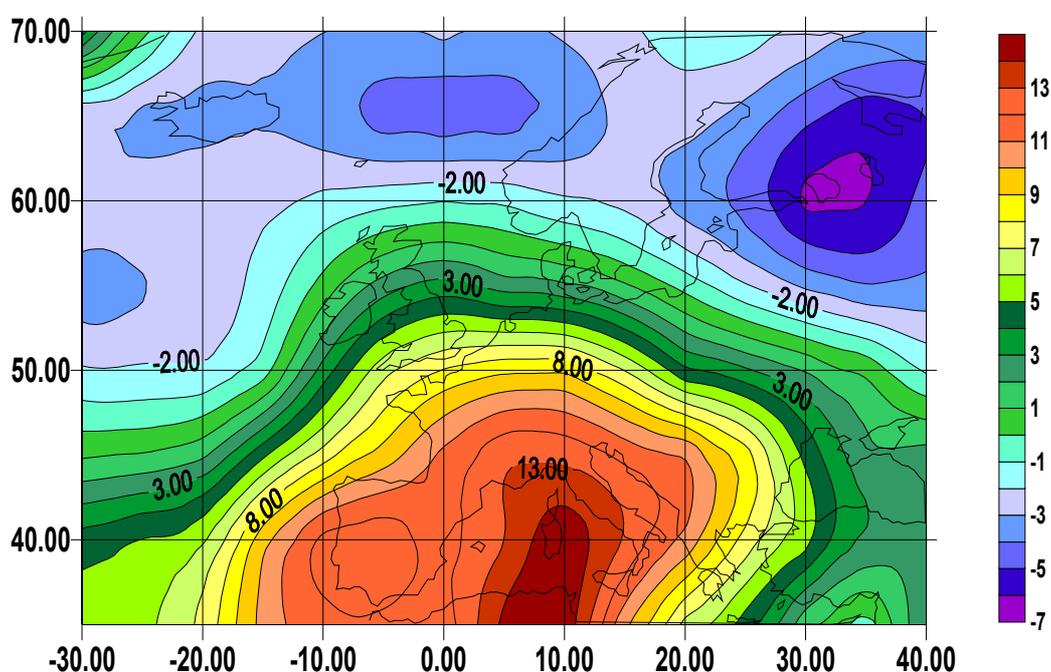


Figura 14. . Mapa de anomalías medias de presión (m geodinámicos) a 700 hPa, entre 1970-1979 y 1990-1999. El periodo más reciente muestra un sensible aumento de la presión atmosférica sobre la Cuenca Occidental del Mediterráneo (NCAR,

National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, W. M. SPANGLER and R.L. JENNE, Northern Hemis. Tropo. Anals.).

Este efecto anticiclónico ha estado en consonancia con las condiciones cálidas y de sequía que se han desarrollado sobre la región mediterránea y sobre la Región de Murcia durante la última década. Especialmente la sequía parece haber afectado con cierta severidad las tierras mediterráneas (Figuras 15 y 16).

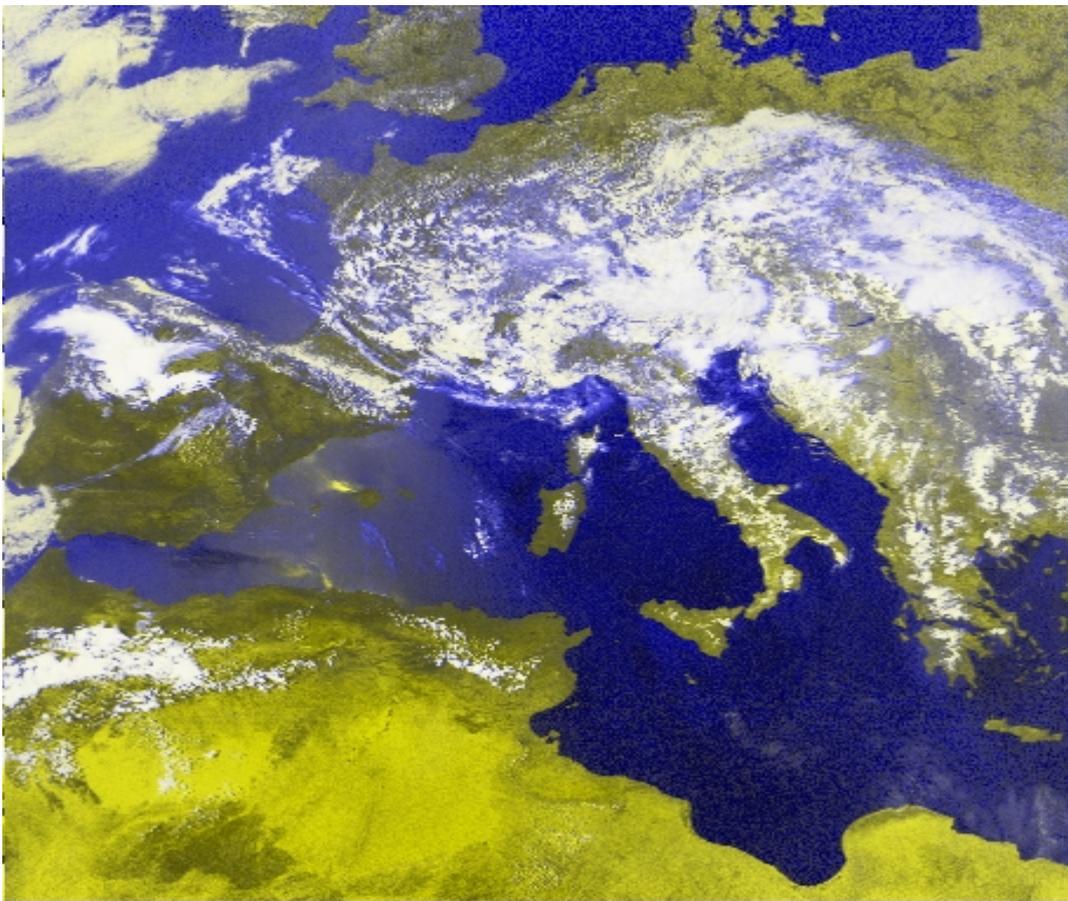


Figura 15. La imagen NOAA del día 1 de julio de 1999, Canal VIS (Laboratorio de Climatología, Universidad Jaume I) muestra la irrupción del gran aerosol africano sobre la fachada oriental de la Península Ibérica en consonancia con la cúpula anticiclónica.

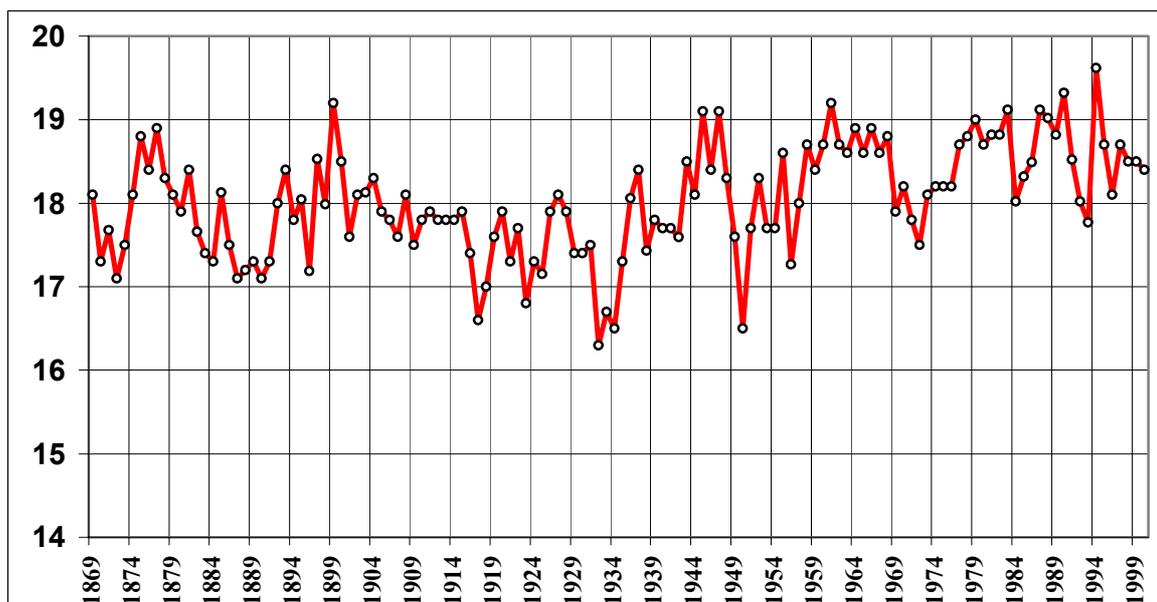


Figura 16. Evolución térmica en el observatorio de Murcia (1870-2000).

V. Una proyección de los posibles escenarios climáticos de la Región de Murcia en el siglo XXI.

Sin embargo, a pesar de la formidable aportación de los modelos de cambio climático, las simulaciones del clima futuro realizadas por ellos sobre sistemas cerrados océano-atmósfera de la Circulación General, resultan todavía muy inciertas. Realmente es muy difícil prevenir cual va a ser el impacto de ese efecto e incluso su misma existencia. En este orden de conocimientos consideramos que los análisis de la evolución climática regional, como el desarrollado aquí, pueden contribuir eficazmente a configurar un escenario de la evolución climática futura, especialmente en ámbitos espaciales complejos y reducidos. Un escenario futuro que constituye el objetivo principal de nuestro informe.

A este respecto, y al objeto de configurar el posible escenario climático de la Región de Murcia durante el siglo XXI, hemos procedido inicialmente a determinar el comportamiento y las tendencias climáticas registradas en la densa red de observatorios meteorológicos regionales. Un conocimiento que simultáneamente ha permitido precisar dos objetivos. El primero ha sido el de verificar si las tendencias climáticas regionales en temperaturas y precipitaciones, muestran una *evolución secular* acorde con los escenarios previstos por los modelos cerrados atmósfera-océano de Cambio Climático Global analizados. El segundo objetivo ha sido el de proporcionar a nuestro diseño de escenario climático futuro las tendencias latentes que el clima ha venido

mostrando en los finales del siglo XX y que, sin duda, podrían estar anticipando las condiciones venideras. Esta será la proyección del escenario climático futuro desarrollada en el epígrafe VI.

Consecuentemente, la primera proyección de estos escenarios posibles va a derivarse de la misma evolución que los elementos climáticos regionales han mostrado a lo largo del siglo XX y especialmente en sus últimas décadas. Una proyección que, simultáneamente y a nivel el año 2000, servirá para verificar que el comportamiento y las tendencias climáticas registradas sobre la densa red de observatorios meteorológicos regionales muestra una *evolución secular* acorde con los escenarios previstos por los modelos cerrados atmósfera-océano de Cambio Climático Global analizados.

V.1. La evolución de las temperaturas.

Nos hallamos ante la cuestión clave de la hipótesis del cambio climático. En efecto, el aumento térmico, a las distintas escalas globales o regionales, viene siendo estimado básicamente a partir del análisis de las temperaturas obtenidas en las principales estaciones regionales u observatorios históricos. No obstante, este análisis presenta dificultades ya que ciertos procesos no climáticos como el englobamiento de los observatorios por las ciudades y el cambio de localización de la mayor parte de los observatorios deben ser tenidos en cuenta. De ahí el riguroso análisis con que finalmente hemos investigado este proceso.

A este fin el análisis de la evolución térmica ha sido efectuado bajo dos criterios fundamentales: una homogeneización rigurosa de todas las series térmicas y una comparación exhaustiva entre observatorios "urbanos" y observatorios "rurales". Especialmente es de destacar la aplicación del test de ALEXANDERSSON (1986) y ALEXANDERSSON y MOBERG (1997) para la homologación y eventual corrección de las series térmicas. Esta técnica, comenzada a desarrollar en la Europa nórdica, está llamada a ofrecer resultados prometedores y, en todo caso, a validar los resultados de tratamiento con métodos o tests más simples como los empleados hasta ahora.

V.1.1. Los observatorios y los datos. Los datos utilizados para este análisis corresponden a la red de observatorios meteorológicos de la Región de Murcia cuyas series observacionales cuentan con una longitud mayor de cincuenta años. No obstante y al objeto de dotar de mayor precisión a los análisis se han incluido alguno de los principales observatorios de la Provincia de Alicante que climáticamente constituye una

vertiente marítima de la propia Región de Murcia. En conjunto esta red comprende 3 estaciones de primer orden y 30 de segundo orden (Figura 17). Los datos de base (I.N.M., Instituto Nacional de Meteorología) han sido las medias mensuales de las temperaturas medias mínimas y máximas.

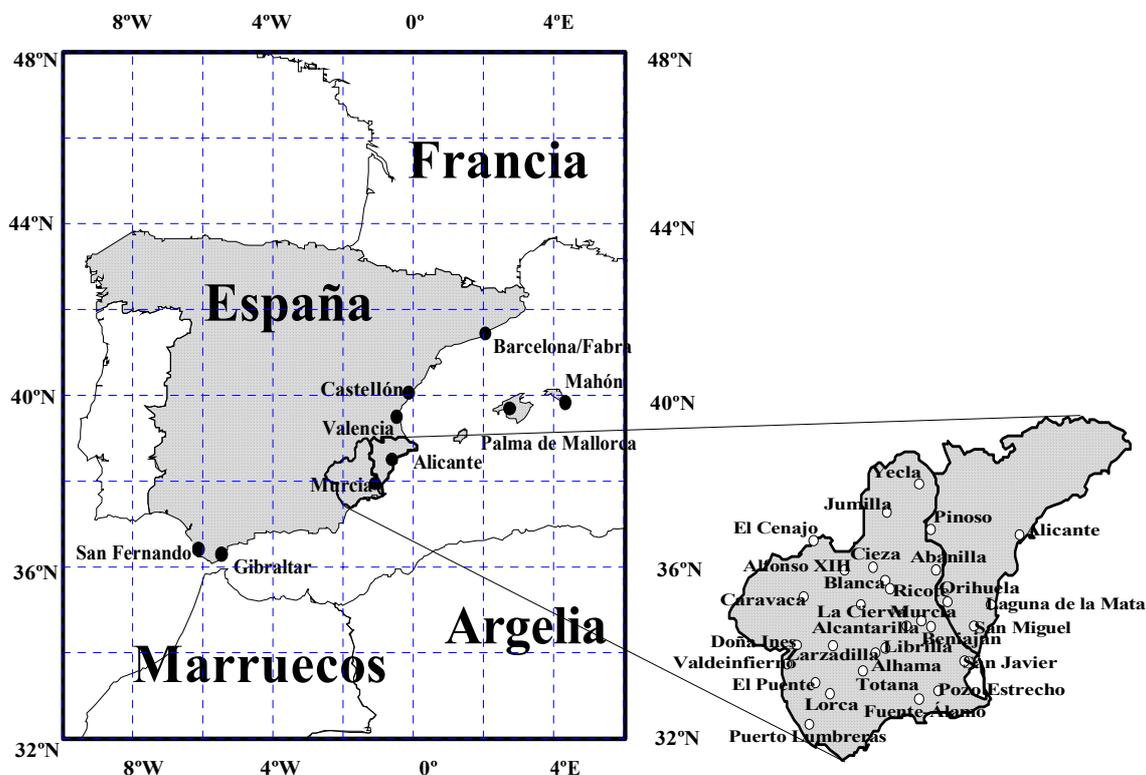


Figura 17. Mapa de los principales observatorios de la Región de Murcia y Provincia de Alicante utilizados en este estudio.

Dado que la validez de toda conclusión sobre la evolución del clima depende de la calidad de los datos, todas las series utilizadas han debido ser sometidas a un cierto número de operaciones de control. La primera etapa de tratamiento de los datos ha consistido en testear la continuidad y coherencia espacial de las medias térmicas mensuales con reconstitución de los valores inexistentes por ausencia o pérdida. Asimismo, los valores que no estaban comprendidos en el intervalo de confianza al 99 % han sido rechazados. Todos estos valores, ciertamente poco numerosos y en ningún caso superiores al 3 % de la longitud de serie, han sido reconstituidos con la ayuda de una interpolación simple con las medias de los observatorios más próximos y de mejor coeficiente de correlación, $r > 0.7$.

En una segunda fase, las series climáticas establecidas han sido sometidas a un control de homogeneidad. En este orden de conocimiento, un tratamiento inicial mediante los tests de homogeneidad interna (métodos de secuencias y de Helmert) y los

tests de homogeneidad relativa han permitido considerar que la mayor parte de las series no eran aleatorias. En consecuencia todas las series utilizadas han sido sometidas a un cierto número de operaciones de control de homogeneidad y corrección de heterogeneidades. Las técnicas utilizadas se han basado en la metodología expuesta por ALEXANDERSSON (1986) y ALEXANDERSSON y MOBERG (1997). Una metodología que recogiendo las mejores innovaciones estadísticas proporciona, hoy por hoy, una de las mejores aproximaciones al problema de tratamiento de las series climáticas temporales.

En este último test, método de Alexandersson, una serie es definida como homogénea con relación a una serie sincrona de referencia si las diferencias o ratios entre observaciones simultáneas constituyen una serie de números aleatorios. Para ello es obligado definir una serie de referencia. Esta serie debe imperativamente presentar caracteres de homogeneidad y buena correlación con la serie estudiada. No obstante, si bien es fácil encontrar para cada observatorio a testear un observatorio próximo presentando una buena correlación con la serie estudiada, resulta por el contrario delicado caracterizar la homogeneidad interna de cada serie. Ello obliga a calcular una serie media de referencia con las diferentes series y en la que las heterogeneidades queden difuminadas.

Ciertamente, aquí podría radicar una debilidad del método. En efecto, el procedimiento consiste en promediar series homogéneas o no, esperando atenuar el efecto de las rupturas en las series no homogéneas, que desgraciadamente son la mayor parte. Si ello permite la mayor parte del tiempo detectar las rupturas de homogeneidad sobre la serie en test, es preciso no olvidar que los coeficientes correctores deducidos de la serie de diferencias o ratios están sesgados. El corregir una serie a partir de otra serie de referencia implica generalmente la igualación de las tendencias de la serie corregida y de la serie de referencia. De este modo, si no se está seguro de la calidad de la serie de referencia, lo que es a priori el caso, los resultados pueden ser falseados. Es por ello por lo que hemos adoptado una precaución. Esta es la de eliminar del cálculo de referencias las series claramente no homogéneas con coeficiente de correlación menor de 0.7. Obvio es señalar que la red de observatorios mostrada en la figura 17 ha cumplido con esta cautela.

Una referencia específica a cada observatorio es así calculada. El cálculo consiste en una media ponderada mediante los cuadrados de los coeficientes de correlación a fin

de que cada serie tenga el peso específico que le corresponda en la configuración de la serie de referencia. De este modo se forma una serie con las diferencias (temperaturas) o con los coeficientes (precipitaciones) entre los valores a testear y los de referencia. En esta serie, que es normalizada, el test trata de descubrir un cambio con respecto a la media. Para cada paso de tiempo, mes o año, un valor de test es calculado y comparado al valor crítico para una confianza dada. En caso de sobrepasar este valor crítico se considera que existe heterogeneidad. La fecha más probable de ruptura de homogeneidad corresponde al valor máximo del test (Figura 18).

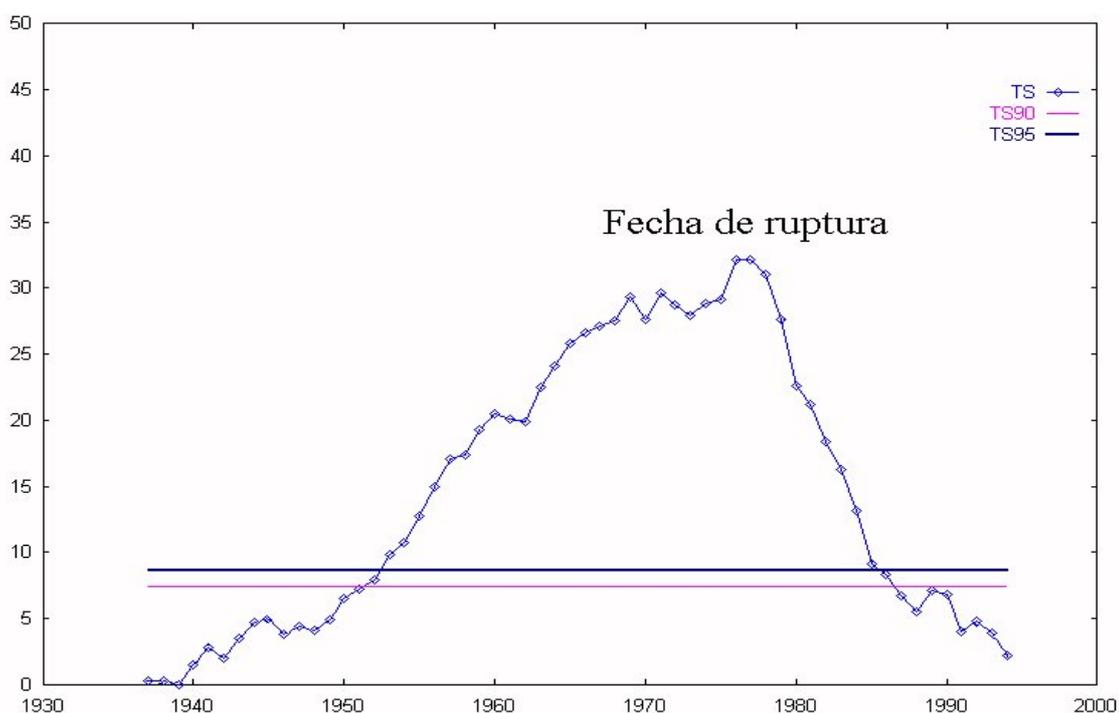


Figura 18. Ejemplo de gráfico del método de Alexandersson: TS, test estadístico sobre la serie de diferencias de Jumilla (Murcia). Las líneas horizontales representan el intervalo de confianza al 90 y al 95 % del test.

Este test, como los otros más convencionales, nos ha permitido considerar que una gran parte de las series no eran aleatorias. Por ello hemos procedido a la corrección de heterogeneidades para disponer de la suficiente calidad en las series para garantía de las conclusiones de tendencia.

En esta tercera fase, la más laboriosa, todas esas rupturas de homogeneidad han sido corregidas a partir de la fecha mostrada por el test de Alexandersson. Sin embargo es preciso señalar que, en la mayor parte de los casos, se han verificado y confirmado tales rupturas mediante el histórico de cada uno de los observatorios, sin menoscabo de las ignorancias para las que el test está precisamente concebido. El periodo que se

considera heterogéneo es el que está situado antes de la fecha de ruptura. El método utilizado para la corrección de las heterogeneidades ha consistido en establecer la diferencia entre la media del periodo en la serie a corregir y la media del periodo en la serie homogénea y de sumar esa diferencia a los valores de la serie a corregir. Para calcular la media se ha utilizado la fórmula propuesta por ALEXANDERSSON y MOBERG (1997). Los coeficientes de correlación entre las series tratadas de las temperaturas medias deben mostrar una buena conexión, $r > 0.7$.

V.1.2. Resultados del análisis: La evolución secular de las temperaturas en la Región de Murcia. La evolución de la temperatura media anual muestra una apreciable tendencia de calentamiento climático (Figura 19). Esta tendencia media regional ha alcanzado valores de 0.5 °C a lo largo de la segunda mitad del siglo XX. Sin embargo, tanto los diferentes valores entre observatorios cómo la diferencia de comportamiento entre las temperaturas máximas y las mínimas sugieren una heterogeneidad de calentamiento y, consecuentemente, algunas incertidumbres y reflexiones.

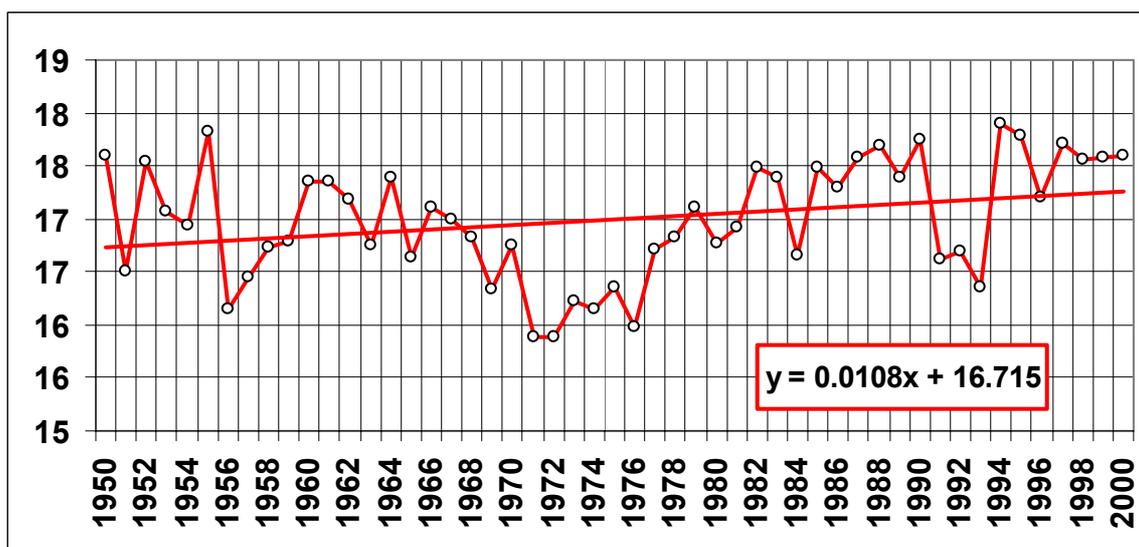


Fig. 19. Evolución de la temperatura media anual como promedio de la Región de Murcia.

A este respecto, y tras el complejo y laborioso proceso de homogeneización y corrección de heterogeneidades, podemos estimar que una parte de esa elevación de la temperatura, 0.5 °C sobre la segunda mitad del siglo XX, podría resultar del efecto urbanización. Un efecto que se manifiesta progresiva y acumulativamente ya que los observatorios han sido absorbidos paulatinamente por la expansión de las ciudades. El resultado de este proceso puede venir reflejado en el hecho de que toda la elevación

térmica se ha venido produciendo exclusivamente en las temperaturas mínimas, con un valor de 0'8 °C a lo largo del periodo 1950-2000 (Figura 20). La evolución de las temperaturas máximas, con - 0'2 °C, igualmente durante la segunda mitad del siglo XX, apenas ha mostrado tendencia alguna y en todo caso ésta sería de enfriamiento.

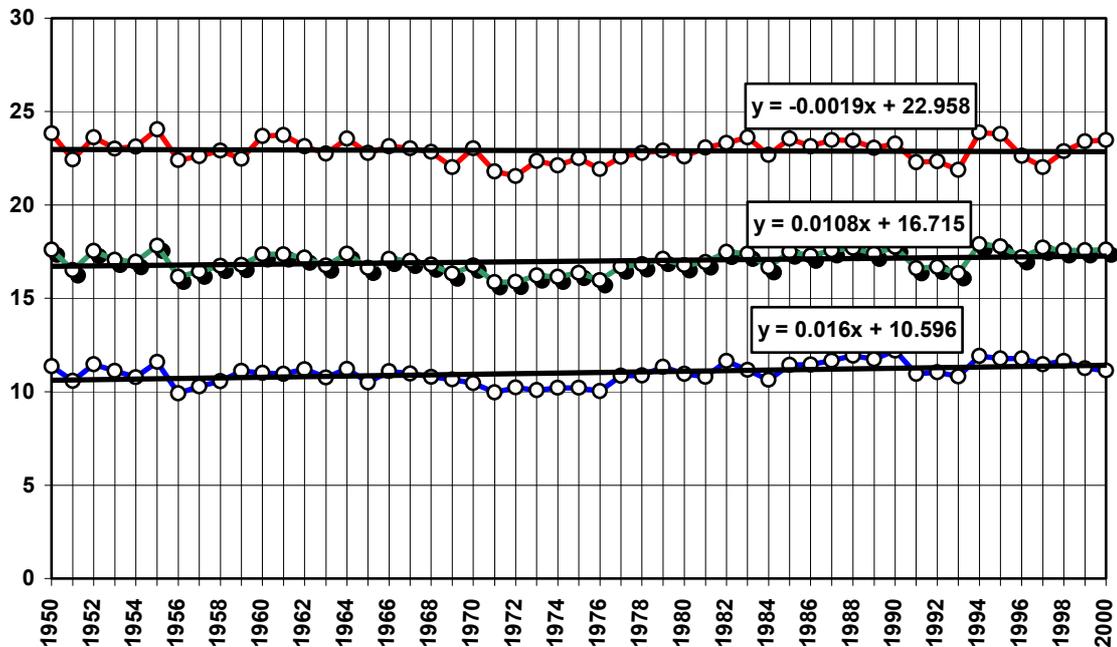


Figura 20. Evolución y tendencia de las temperaturas medias anual, máxima y mínima en los observatorios de la Región de Murcia y de la Provincia de Alicante. Fuente: I.N.M. y elaboración propia.

Consecuentemente, los contrastados comportamientos de las temperaturas máximas y mínimas se han traducido en una reducción de la amplitud térmica diaria media (Figura 21).

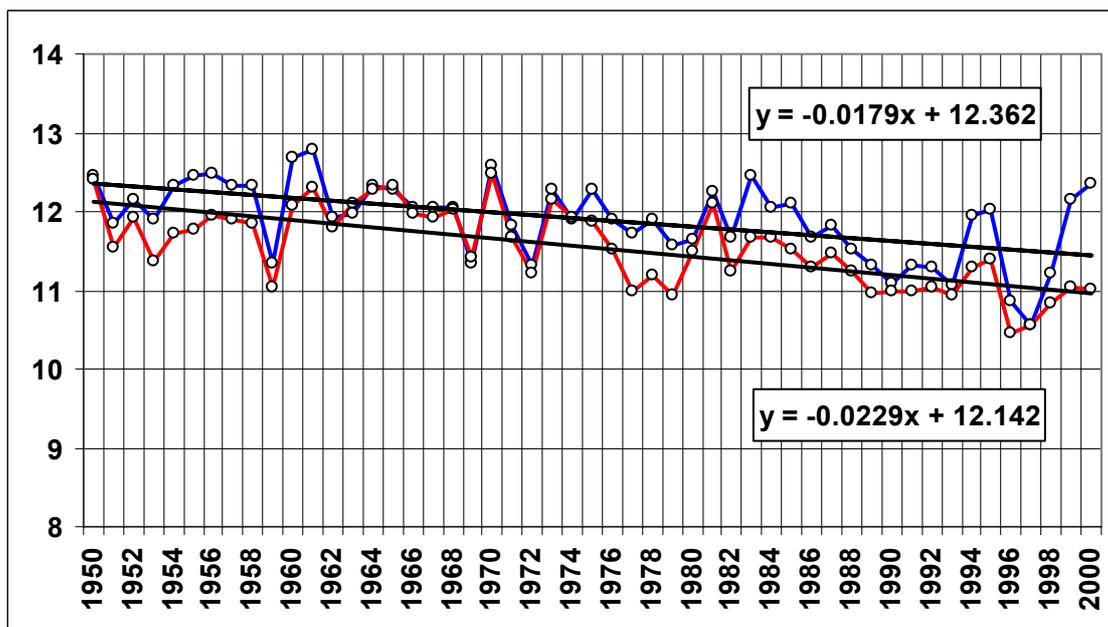


Fig. 21. *La reducción de las amplitudes medias diarias ha sido una constante a lo largo de la segunda mitad del siglo XX. Una reducción que ha sido más intensa en las grandes ciudades (Curva inferior).*

Este proceso viene además evidenciado por el hecho de que simultáneamente a esa mayor reducción de la amplitud térmica diaria, la elevación de las temperaturas registrada en los 3 observatorios enclavados en urbes de más de 100.000 habitantes (Murcia, Elche y Alicante) ha sido mayor que en el resto de los observatorios (Figura 22). De este modo, y durante la segunda mitad del siglo XX, la temperatura de los observatorios urbanos se ha elevado 0.6 °C, mientras que la de los observatorios rurales tan sólo habría ascendido 0.4 °C. En consecuencia, esta diferencia permite concluir que la verdadera “elevación natural” de la temperatura, corregida del efecto urbanización, podría ser más reducida de lo que los actuales modelos preconizan.

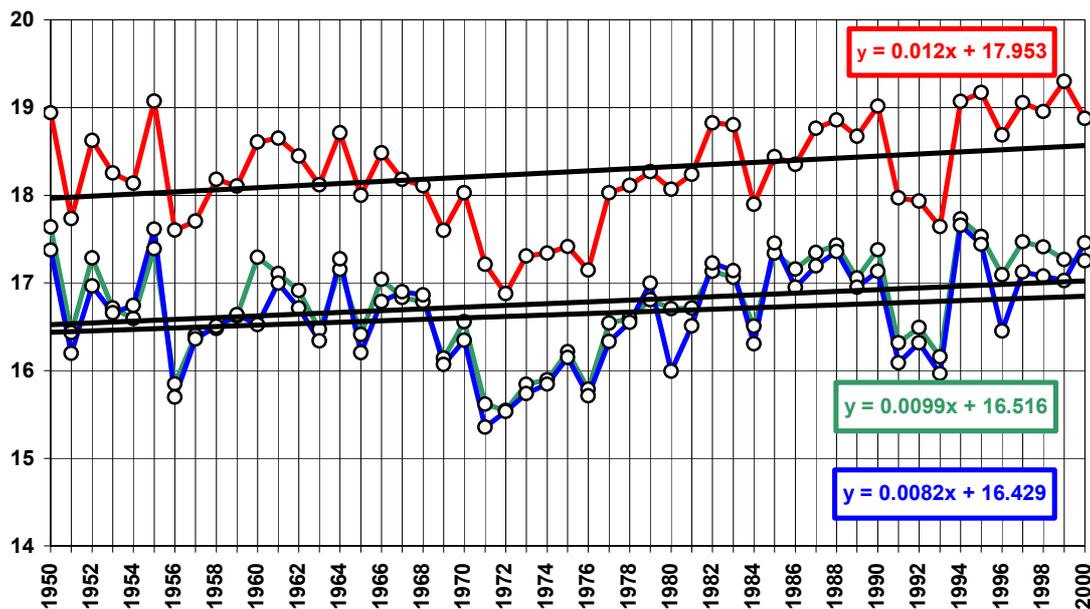


Figura 22. Evolución y tendencia de la temperatura media anual en los observatorios urbanos de Murcia, Elche y Alicante, así como en los restantes observatorios “más rurales” (De 80 a 20.000 y menores de 20.000 habitantes) Fuente: I.N.M. y elaboración propia.

Ciertamente que este proceso puede ser debido también, como señalan algunos autores, al aumento de la nubosidad. Sin embargo, de recurrir a esta causa, deberá explicarse por que ese aumento de nubosidad sólo se ha producido durante los periodos nocturnos o de temperaturas mínimas. Un proceso que ciertamente no ha sido posible verificar. El efecto de calor urbano permanece pues como un auténtico talón de Aquiles de las actuales estimaciones sobre las tendencias y valores del calentamiento climático. La evolución térmica del observatorio de Murcia resulta paradigmática en este orden de conocimientos.

La historia del observatorio meteorológico de Murcia ha proporcionado una buena experiencia sobre los procesos térmicos asociados al crecimiento de las ciudades. Experiencia que, en síntesis, ha permitido “substraer” la influencia de calor urbano que podría venir afectando a los termómetros del observatorio. El observatorio, creado en 1869, se trasladó en 1954 desde el Instituto Alfonso X a la Universidad, donde permaneció catorce años hasta su nuevo traslado a Vistabella en 1967. En Vistabella permanece hasta 1984 en que se traslada a la villa de Guadalupe, si bien el I.N.M. ha

mantenido el observatorio de Vistabella de modo que las observaciones vienen siendo simultáneas. Los traslados iniciales, especialmente el de 1967 desde la Universidad, en el centro urbano, a Vistabella en el exterior, quedan reflejados en el gran retraso y amortiguamiento de los efectos urbanos sobre las temperaturas registradas (Figura 23). Cuando estos efectos, que ya se comenzaban a registrar, podrían haberse dejado sentir más intensamente el observatorio es desplazado (1967) hacia una periferia abierta junto al río Segura, Vistabella. En cualquier caso, la aportación urbana queda de manifiesto en la evolución seguida por las temperaturas mínimas en el observatorio de Vistabella y la crisis que experimentan con el traslado al nuevo observatorio situado en la localidad vecina de Guadalupe. Una aportación que, insensible en las temperaturas máximas, se acusa bruscamente en el notable descenso de las temperaturas mínimas desde 1985, año del traslado a Guadalupe. Es además muy significativo que el mismo observatorio de Guadalupe esté registrando una elevación progresiva de las temperaturas mínimas en los últimos años. Un signo que igualmente viene a mostrar que ese 0.4°C de aumento térmico “natural” estimado sobre el valor de tendencia de los observatorios “rurales” también podría estar afectado artificialmente.

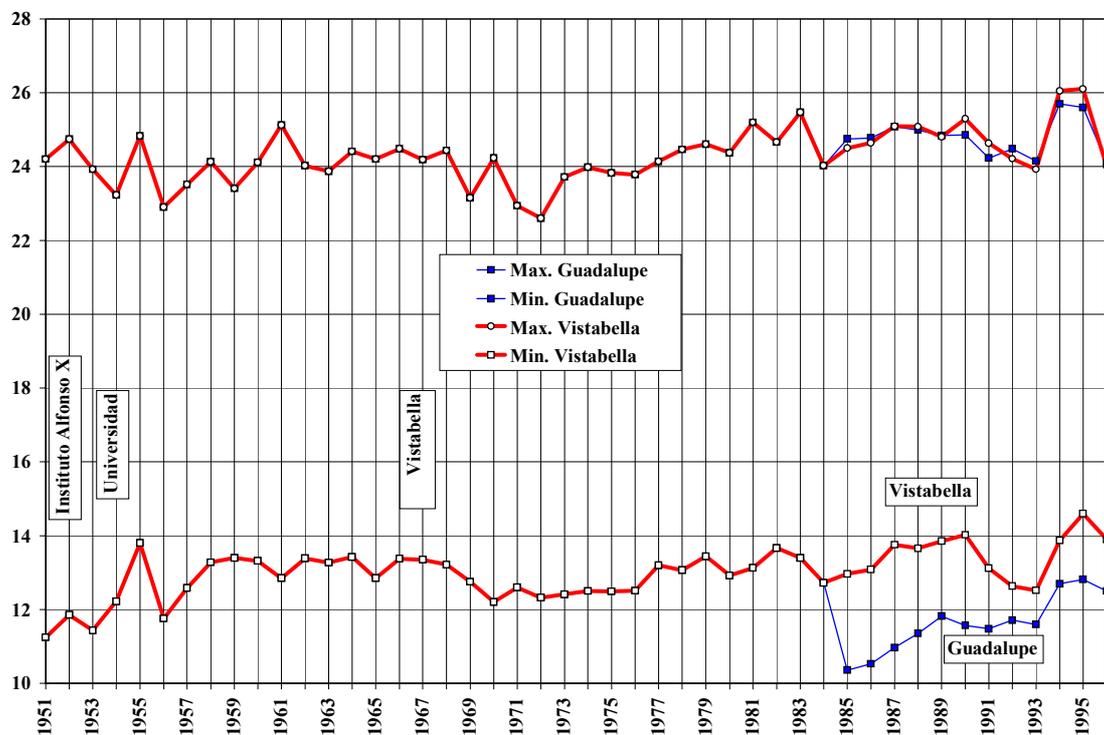


Figura 23. Evolución de las temperaturas máximas y mínimas del observatorio de Murcia en sus diversas ubicaciones. Fuente: I.N.M. y elaboración propia

En consecuencia, asumiendo que el calentamiento de los observatorios "rurales" fuese la tendencia natural del clima en la región mediterránea española, el valor del mismo habría sido de tan sólo 0.4 °C durante la segunda mitad del siglo XX. No obstante, todavía sería precisa una matización al hecho de asumir ese valor como representativo del calentamiento natural puro. En efecto, bajo el epígrafe o calificativo de "rurales" estamos englobando observatorios enclavados en aglomeraciones de más de 10.000 habitantes y con fuerte crecimiento urbanístico. Consecuentemente, en ese valor de calentamiento de 0.4 °C a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, también podría estar camuflando algún valor de efecto urbano, tal y como ha mostrado la evolución térmica del observatorio de Guadalupe. En todo caso, y dado que este aumento parece compatible con el aumento previsto por los modelos globales más moderados según las emisiones de GEIs futuras (SRES), la región de Murcia podría asistir a un escenario climático caracterizado por un aumento de temperaturas que oscilaría entre 0.5 °C a mediados del siglo XXI y 1 °C a finales del mismo.

V.1.3. Resultados del análisis: La evolución de las precipitaciones en la Región de Murcia. Con la misma metodología científica utilizada para el tratamiento de las temperaturas, el análisis de las series pluviométricas de la Comunidad de Murcia y de la Provincia de Alicante ha mostrado una tendencia hacia la reducción de las precipitaciones a lo largo de la segunda mitad del siglo XX. Esta reducción ha alcanzado un valor de trend de 0.65 mm anuales, es decir de 32 mm al año entre la década de 1950 y finales de siglo (Figura. 24).

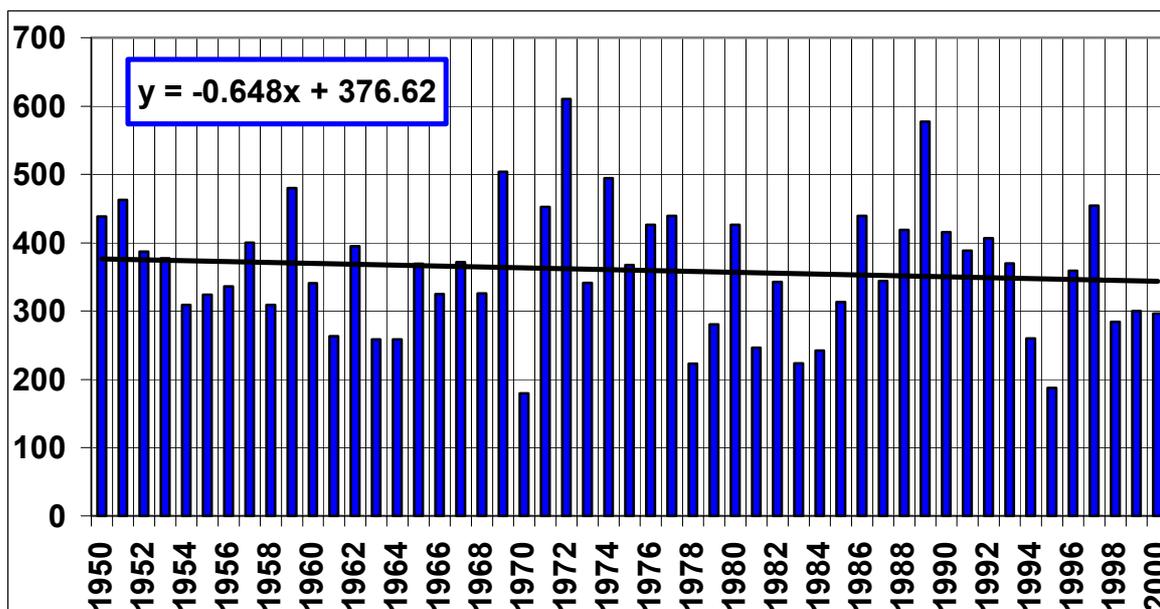


Figura 24. Evolución de las precipitaciones en la Región de Murcia a lo largo de la segunda mitad del siglo XX.

No obstante esta tendencia negativa no se manifiesta más que durante la segunda mitad del siglo XX, ya que si la establecemos a partir de 1934 con los veinte observatorios que tienen series completas, el valor del trend resulta altamente positivo. Como consecuencia del mismo las precipitaciones habrían mostrado un incremento de 65 mm entre 1934 y 2000 (Figura 25).

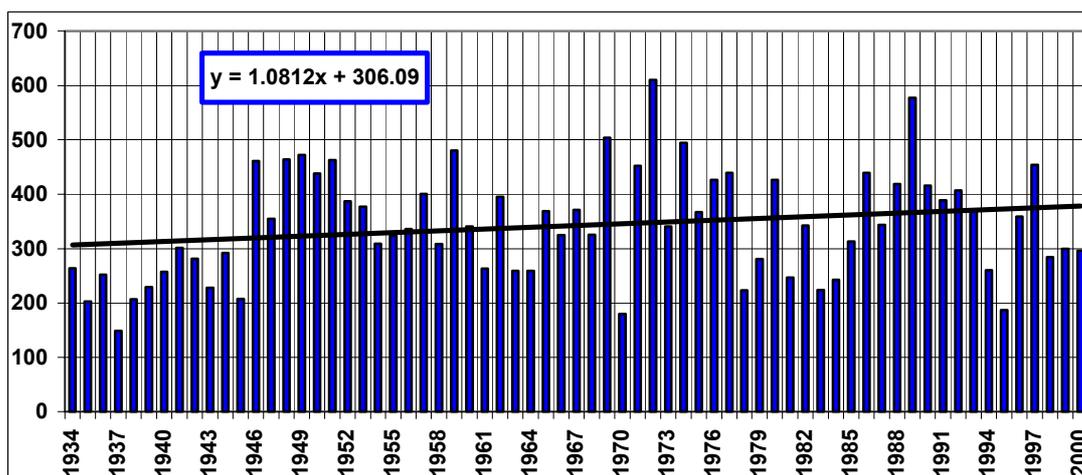


Figura 25. La evolución pluviométrica de la Región de Murcia muestra una tendencia netamente positiva entre los años 1934 a 2000.

Es más, la tendencia hacia la disminución pluviométrica que caracteriza a la segunda mitad del siglo XX, viene totalmente determinada por las dos sequías padecidas durante la última década del mismo, años 1994-95 y 1998-2000 (Figura 26).

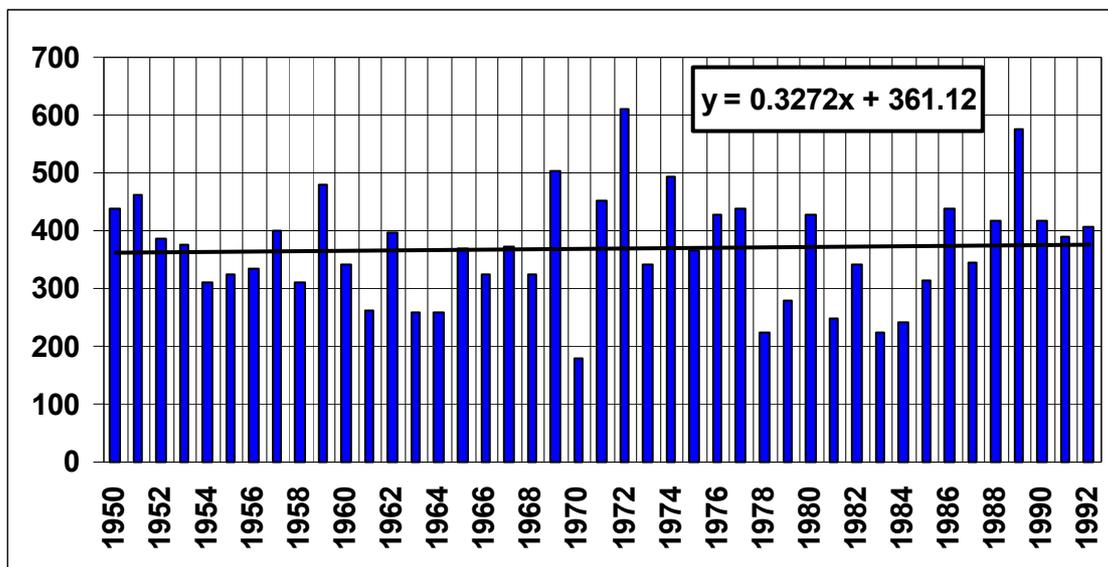


Figura 26. La evolución pluviométrica de la Región de Murcia muestra una tendencia positiva hasta comienzos de la última década del siglo XX.

Como consecuencia de esta evolución tan irregular y en la que han bastado dos sequías sobre los años noventa para marcar una tendencia negativa, la disminución de las lluvias sobre la región de Murcia es un proceso que no adquiere significación estadística. Ello queda de manifiesto mediante la aplicación de los diversos tests de significación. El test no paramétrico de Mann-Kendall (Figura 27) viene a reflejar que todas las anomalías pluviométricas registradas y especialmente esas dos sequías finales del siglo XX se insertan dentro de lo que es la variabilidad natural del clima.

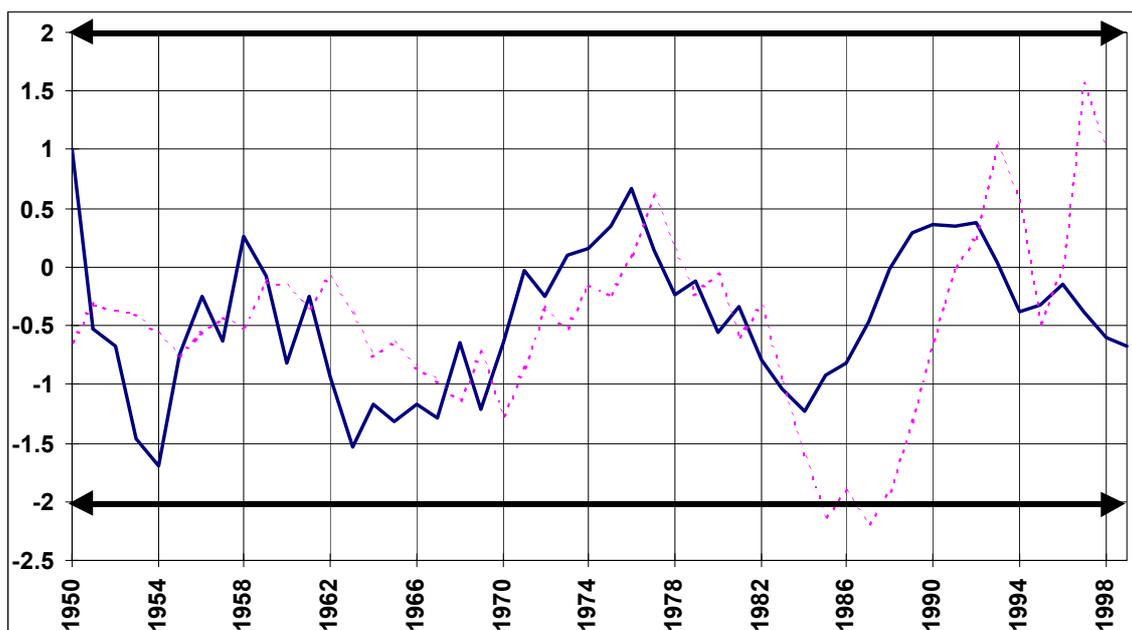


Figura 27. *El test de Mann-Kendall aplicado sobre la serie media regional de las precipitaciones anuales muestra que, en el intervalo de confianza del 95 %, no existe significación estadística de tendencia.*

Estos comportamientos pluviométricos plantean grandes incertidumbres a la hora de proyectar los escenarios de lluvias sobre la Región de Murcia a lo largo del siglo XXI. Unas incertidumbres que también se acusan en los distintos modelos globales aplicados y cuyas más recientes versiones del Hadley Centre para el IPCC moderan las previsiones efectuadas en los modelos. Estos primeros modelos han tendido a exagerar las tendencias hacia una reducción de las lluvias. Los valores proyectados son muy superiores a los mostrados por los procesos que hemos analizado durante la segunda mitad del siglo XX.

En efecto, en los primeros modelos basados en las interacciones atmósfera-oceano sobre el funcionamiento del Sistema climático, el desplazamiento hacia el Norte de la zona subtropical boreal de altas presiones reducía considerablemente la extensión de la zona de lluvias invernales, ahora responsable de la alimentación en agua de la región mediterránea (H. FLOHN, 1979; J. QUEREDA et al., 1996). Como consecuencia de ello sobre la región Mediterránea se produciría una marcada disminución de la lluvia del orden de un 20 a un 25 % en el transcurso de los próximos 40-50 años (M. L. PARRY et al., 1999 y J. QUEREDA et al., 2000).

Este es muy aproximadamente el escenario climático previsto por el IPCC'1998 para el año 2030 y basado en la simulación del *Atmosphere-Ocean Model* con un incremento del CO₂ del 1 % anual y usado por el *United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) para su *Second Scientific Assessment of Climate* (Fig. 25). Las medidas de escala global ya tratadas (M. HULME, 1994) muestran un efecto coincidente sobre el periodo 1981-1995 y son compatibles con el dipolo "deseccación mediterránea -humidificación sobre Europa occidental y nórdica" (J-C. ANDRÉ, et J. ROYER, 1999). La Región de Murcia asistiría a una reducción de un 25-30 % de sus recursos pluviométricos en el horizonte del año 2030.

Tal y como hemos dicho, estos valores son muy superiores a los mostrados por los registros que hemos analizado durante la segunda mitad del siglo XX. Estos registros, paralelamente a un aumento en la altura de la capa de presión de 700 hPa, han mostrado un descenso de las precipitaciones sobre la Región de Murcia de *0.6 mm/año equivalentes a un 5 ó 6% de la precipitación media anual*. De este modo, y con las cautelas debidas, *una previsión razonable del escenario pluviométrico murciano en el horizonte el año 2050 no debería contemplar más que ese 5 ó 6% señalado por las tendencias actuales*.

VI. La previsión del escenario climático sobre la Región de Murcia en el horizonte del año 2050: impactos sobre el ciclo hidrológico.

Como consecuencia de todos los análisis y procesos analizados, creemos que la mejor ponderación de los escenarios climáticos previsibles sobre la Región de Murcia en el horizonte del año 2050 puede venir encuadrada por tres umbrales:

- 1) No es posible descartar un primer escenario basado en la hipótesis de la sostenibilidad climática con sus variabilidades naturales. Una hipótesis justificada en la heterogeneidad de la evolución térmica y pluviométrica observada y carente de significación estadísticas.
- 2) Un segundo escenario, contemplaría un aumento de 0.5°C en la temperatura media anual y un sostenimiento de las actuales precipitaciones. Un escenario basado en las tendencias termopluviométricas seculares de todo el siglo XX.
- 3) Un tercer escenario, el de consecuencias más severas, contemplaría un aumento de hasta 0.5 °C en las temperaturas medias regionales y una reducción de un 5%

en el volumen de sus precipitaciones medias. Este escenario corresponde a la proyección de las tendencias climáticas observadas durante la segunda mitad del siglo XX (1951-2000).

Sin duda que los dos últimos escenarios suscitan de inmediato una preocupación por el impacto que tales variaciones climáticas puedan tener sobre los recursos hídricos. En efecto, la modificación de las condiciones atmosféricas actuales induciría una modificación en el ciclo hidrológico natural y consecuentemente en los recursos hídricos naturales. Es decir que toda alteración climática tendría su traducción inmediata en los valores de la escorrentía total media anual. En este sentido, las sequías pluviométricas podrían venir agravadas además por un crecimiento gradual de las evapotranspiraciones. Así pues, el concepto de ciclo hidrológico síntesis de los procesos climáticos que se desarrollan sobre un territorio, es un concepto clave y como tal viene recibiendo una gran atención.

Esta atención está especialmente justificada en regiones tan deficitarias de agua como la Región de Murcia donde el papel de los recursos hídricos es el protagonista en la configuración territorial (A. CERDA CERDA, 2003). En los momentos actuales, y ampliando el marco a toda la Cuenca del Segura como unidad hídrica independiente, la escorrentía se halla en valores inferiores a 50 mm/año, lo cual constituye la menor aportación específica del territorio español. Este valor es 20 veces inferior al de Galicia y 5 veces inferior a la media española (Figura 28). De esta escorrentía total deriva la recarga natural o componente subterránea de los acuíferos. Una situación de escasez hídrica que todavía alcanza caracteres de mayor severidad sobre los 11.314 Km² de la Comunidad de Murcia y en la que tan solo un 30 % del territorio superaría los 10 mm de escorrentía media anual.

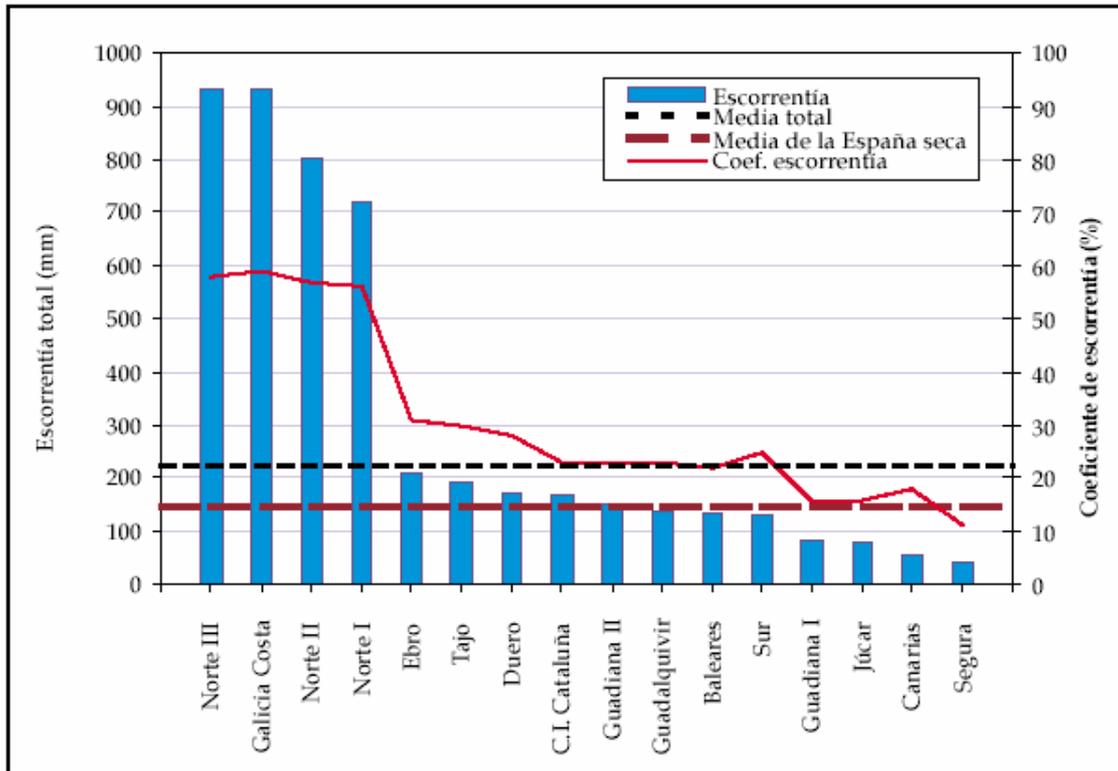


Figura 28. Escorrentías medias anuales (mm) y coeficientes de escorrentía en régimen natural en las cuencas hidrográficas de España (Libro Blanco del Agua, MIMAM 2000).

VI.1 .La evaluación de los recursos hídricos sobre la Comunidad de Murcia.

En este orden de conocimientos, la evaluación de los recursos hídricos totales, superficiales y subterráneos, ha sido efectuada mediante la concepción del ciclo hidrológico. En este concepto, los recursos naturales propios son los que se generan a partir de la precipitación y que subsistentes a la evapotranspiración nutren y son aportados a través de las escorrentías superficiales directas y la recarga a los acuíferos. Lamentablemente el cálculo de este balance hidrológico en su régimen natural es una tarea que ofrece grandes dificultades y que técnicamente todavía no está bien resuelta. En efecto, los datos básicos para este conocimiento deberían estar basados en las medidas de las estaciones de aforos. Sabido es que estos aforos miden simultáneamente tanto las aportaciones superficiales como también las subterráneas que en cada punto de la cuenca se incorporan al cauce procedentes de infiltraciones aguas arriba. Desgraciadamente los datos de las estaciones de aforos suelen medir regímenes afectados y no es fácil obtener una información suficiente sobre la

evolución de los caudales detraídos o retornados de los ríos en sus diversos usos o afecciones. Todo ello determina que la restitución de los caudales en régimen natural sea una tarea de enormes dificultades (Figura 29).

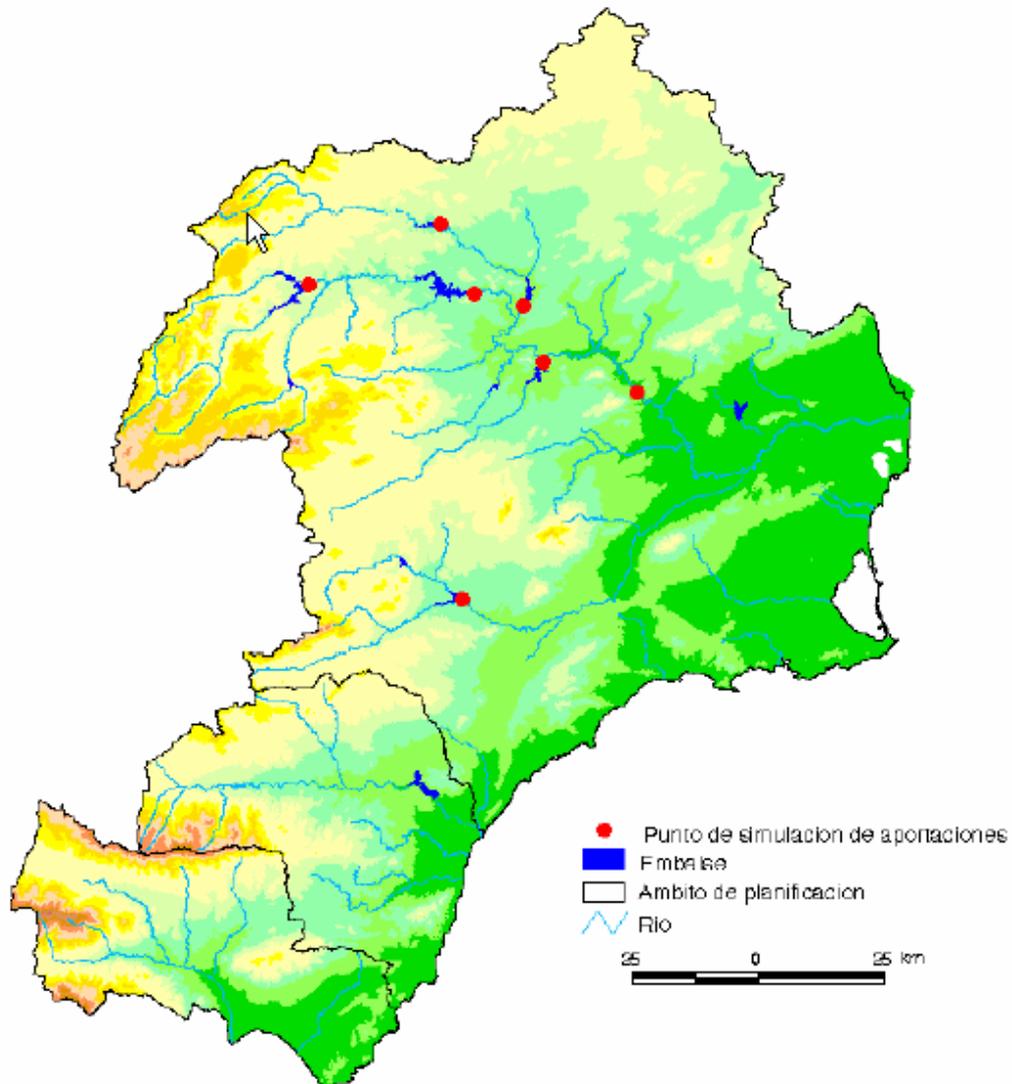


Figura 29. Puntos básicos de evaluación de recursos hídricos en la Cuenca del Segura (PHN).

Frente a esta serie de dificultades que plantean los aforamientos y de las insuficientes redes de medida e información superficiales y subterráneas, la red meteorológica permite mejores resultados. En efecto, ante la estrecha dependencia que el ciclo hidrológico mantiene con los datos climáticos, el conocimiento de los principales valores hidrológicos del clima sobre el territorio, nos permite proceder a su estimación. Esta estimación viene fundamentada en la dependencia que el valor de la esorrentía (E), o aportaciones totales (A), muestra con los valores de la precipitación (P) y con los de la evapotranspiración potencial (ETP) función

esta última de la temperatura. Este método permite alcanzar buenos resultados. Incluso por definición estos resultados pueden ser óptimos sobre la base de reunir dos condiciones. La primera es que la red meteorológica disponible no presente sesgos de localización que falseen la modelización posterior. La segunda, auténtico talón de Aquiles, es la medida de la evapotranspiración. Ambas condiciones han sido debidamente analizadas en nuestros cálculos tal y como se detallan en los apartados correspondientes.

Es por ello por lo que hemos procedido a evaluar los recursos hídricos de la Región de Murcia mediante *la modelización de los elementos climáticos básicos que intervienen en el ciclo del agua*. Estos elementos han sido los registros de las precipitaciones (P) y el cálculo de las evapotranspiraciones potenciales (ETP) y reales (ETR). Elementos de cuyas interacciones surge el concepto básico de la esorrentía total o recursos hídricos disponibles (E) o aportaciones en régimen anual (A):

$$E (A) = P - ETR$$

En el conjunto de estas correlaciones, los valores de ETP son los que suscitan las mayores dificultades e incertidumbres de cálculo ya que la diversidad de métodos, teóricos y experimentales, conducen a magnitudes muy diversas en intensidad y régimen. En la presente estimación de la evapotranspiración potencial (ETP) se ha utilizado el método de Thornthwaite. Frente a todas las posibles incertidumbres, la fórmula de Thornthwaite ha sido debidamente validada mediante la comparación de sus magnitudes con los coeficientes de esorrentía de algunas estaciones de aforos situadas en cuencas de cabecera no afectadas en su régimen natural en los sistemas hidrográficos del Segura y del Júcar. Esta fórmula ha sido ponderada con la de Turc para las regiones más secas y con $P < 400$ mm (C. ALMARZA, 1984).

No obstante, sobre una región con un régimen tan extremadamente irregular de las precipitaciones y de tan compleja configuración orográfica como la de Murcia, con solo un 32 % sobre los 600 metros de altitud, las cantidades de agua disponibles no permiten siempre alcanzar el valor potencial de la ETP. En consecuencia, el valor de la esorrentía total viene mejor determinado a través del concepto de la ETR o evapotranspiración real. Un concepto cuyo valor ha podido ser calculado merced a la buena y densa red de observatorios meteorológicos regionales. De este modo, y definida la E esorrentía o aportación total como la diferencia entre la Precipitación y la ETR, la función que relaciona estas magnitudes es :

$$E = P - ETR$$

Consecuentemente y dadas las estrechas relaciones existentes entre los elementos climáticos que intervienen en el ciclo hidrológico natural, ha sido posible establecer la función de ajuste que vincula las escorrentías totales con las precipitaciones. Los resultados obtenidos sobre los veinte observatorios de mayor longitud de observación y homogeneidad de datos de la Comunidad de Murcia han dado un ajuste bastante aceptable (Figura 30).

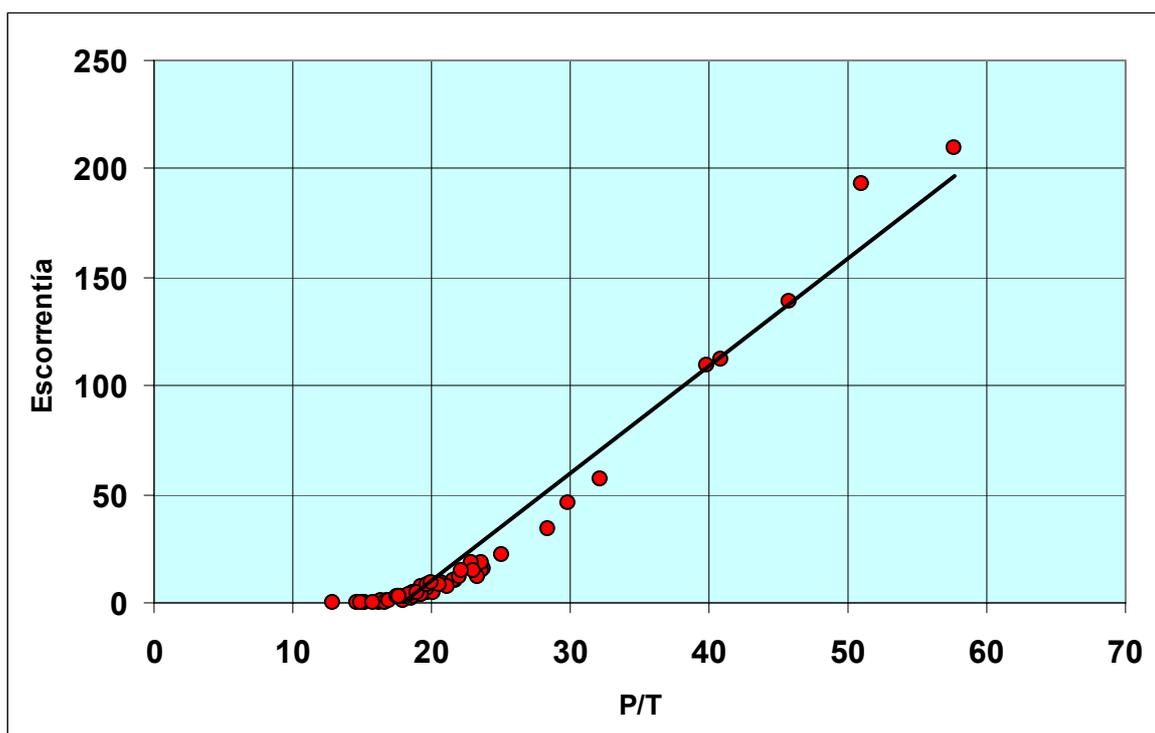


Figura 30. Relación entre la escorrentía regional y los valores de P y T .

VI.2. El escenario climático actual sobre la Región de Murcia y su situación hidrológica.

Ha sido representado mediante la cartografía de los principales elementos climáticos que intervienen en el ciclo hidrológico. De este modo, la cartografía climatológica actual de la Región de Murcia está basada en los valores de la precipitación (P) (Figura 31) y temperatura (T) (Figura 32) extraídos de las series climáticas de la red de observatorios regionales del INM y de la Confederación Hidrográfica del Segura. El valor de la ETP, como ya se ha dicho, ha sido calculado en función del método de Thornthwaite (Figura 33). Estos datos han servido, de acuerdo a la metodología expuesta, para elaborar el mapa de la escorrentía total (E) o recursos hídricos disponibles en régimen natural sobre la Región de Murcia.

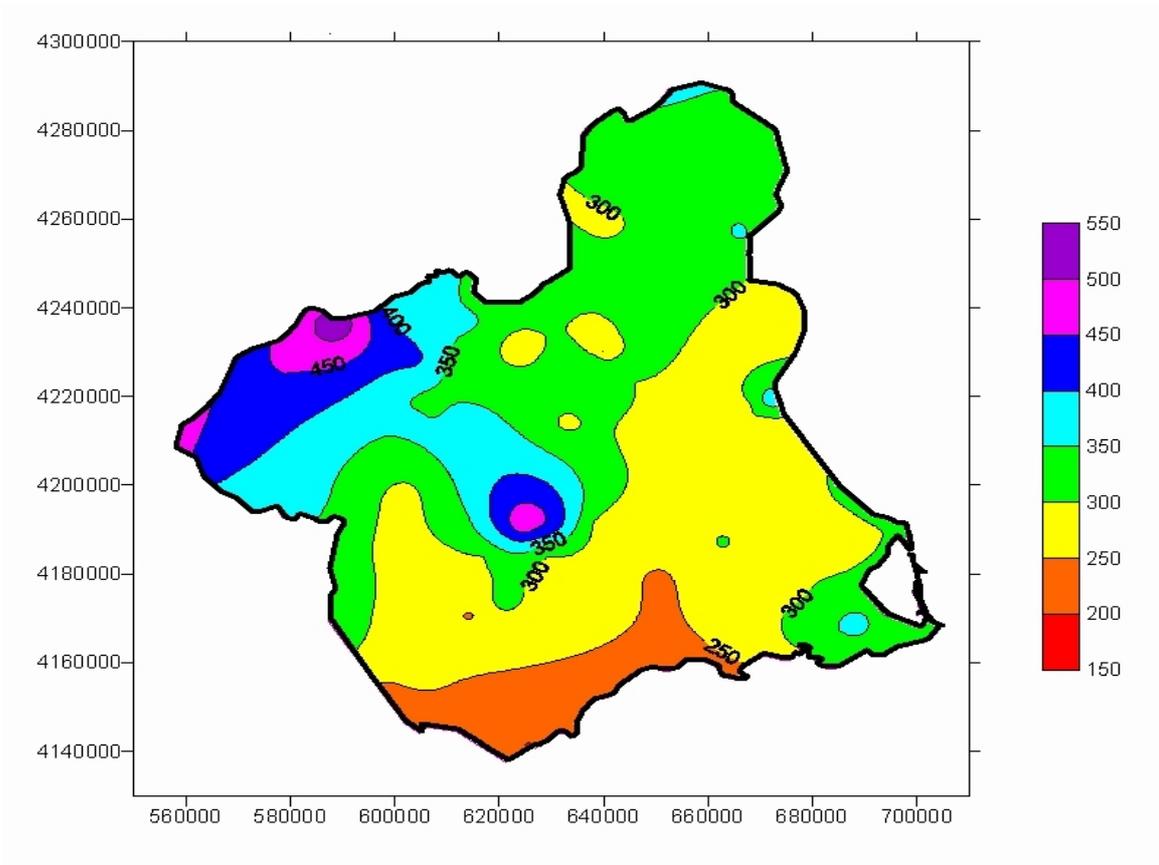


Figura 31. Precipitaciones medias sobre la Región de Murcia (1950-2000)

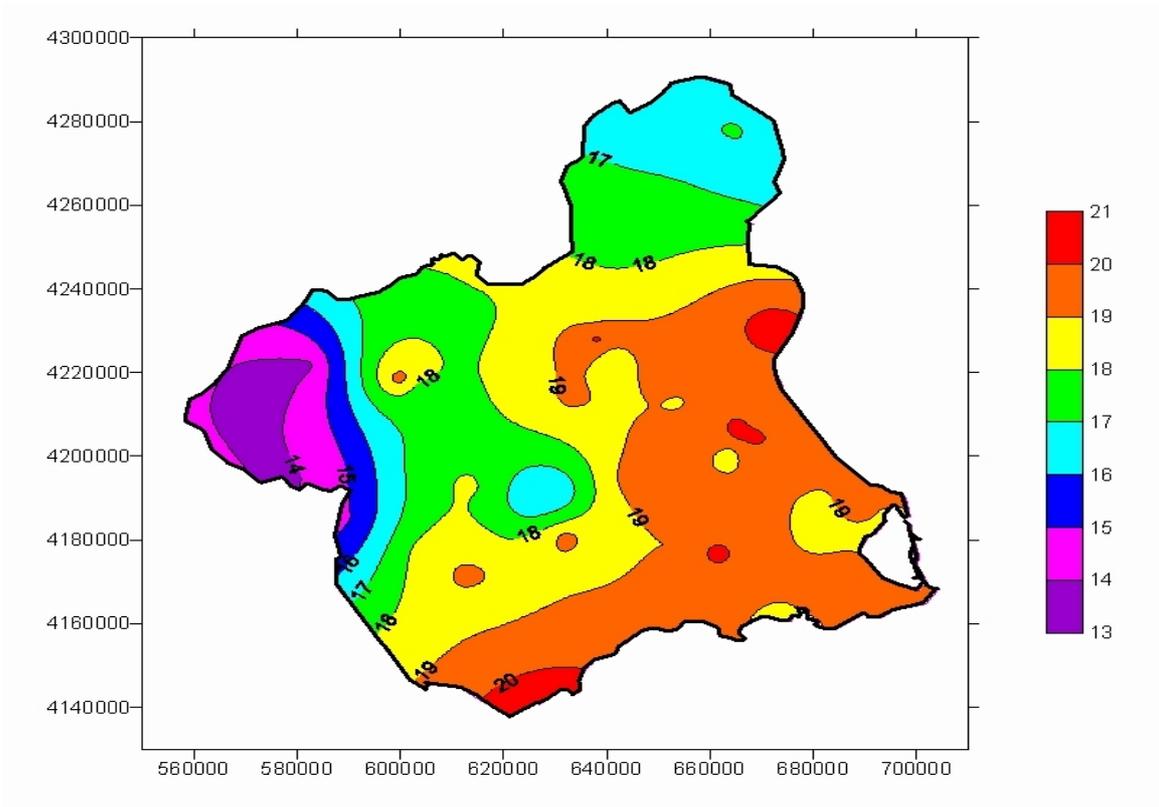


Figura 32. Temperaturas medias anuales sobre la Región de Murcia

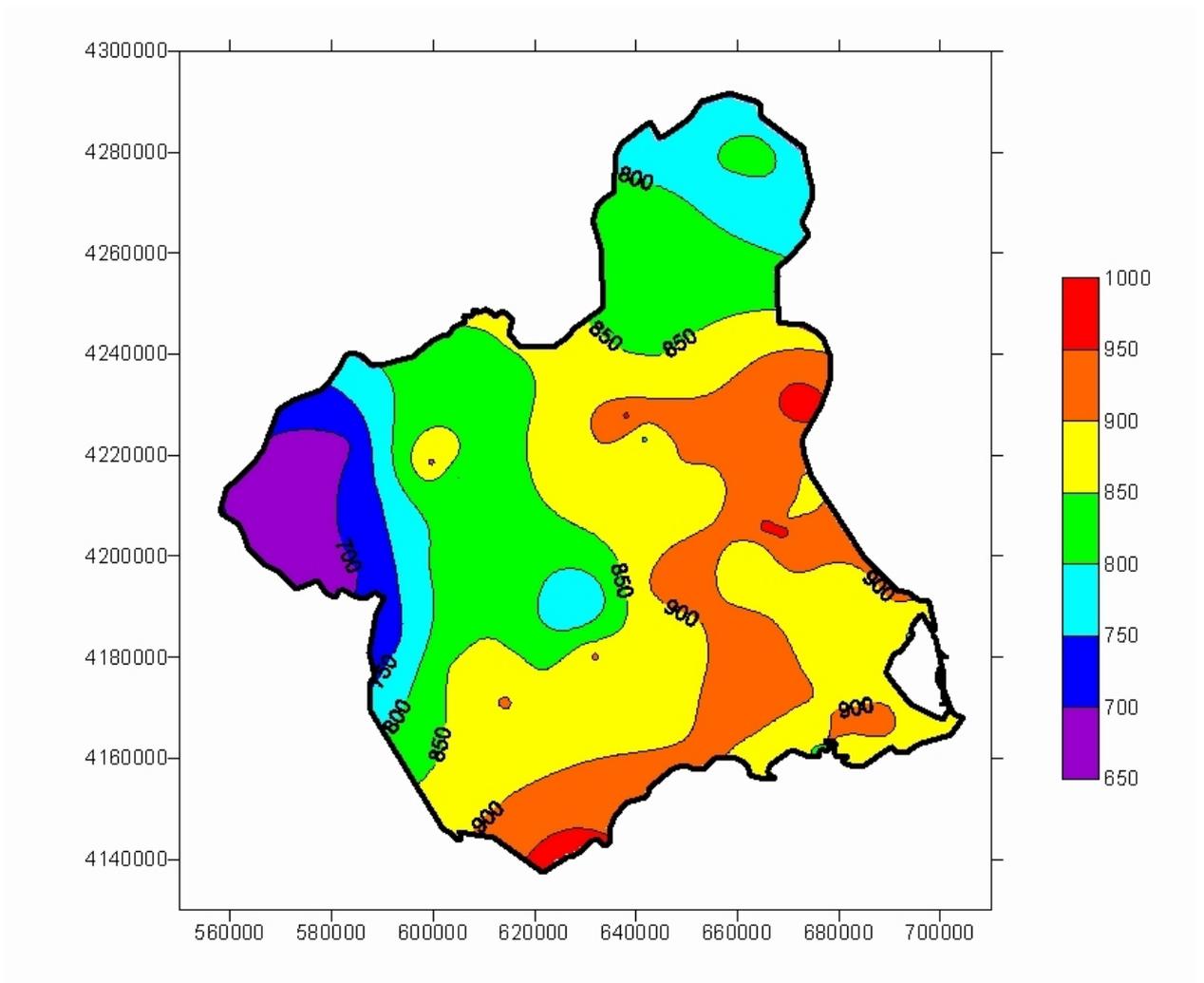


Figura 33. Evapotranspiraciones potenciales medias (ETP) sobre la Región de Murcia (1950-2000).

A partir de estos mapas climáticos de la situación actual se ha calculado el valor de las evapotranspiraciones reales (ETR). El procedimiento utilizado para este cálculo ha sido la elaboración de las correspondientes fichas hídricas de cada una de las veinte mejores estaciones termopluviométricas. Consecuentemente la relación mensual entre las variables de la precipitación y la ETP paralelamente a los procesos de reserva de agua en el suelo ha permitido calcular adecuadamente la ETR (Figura 34).

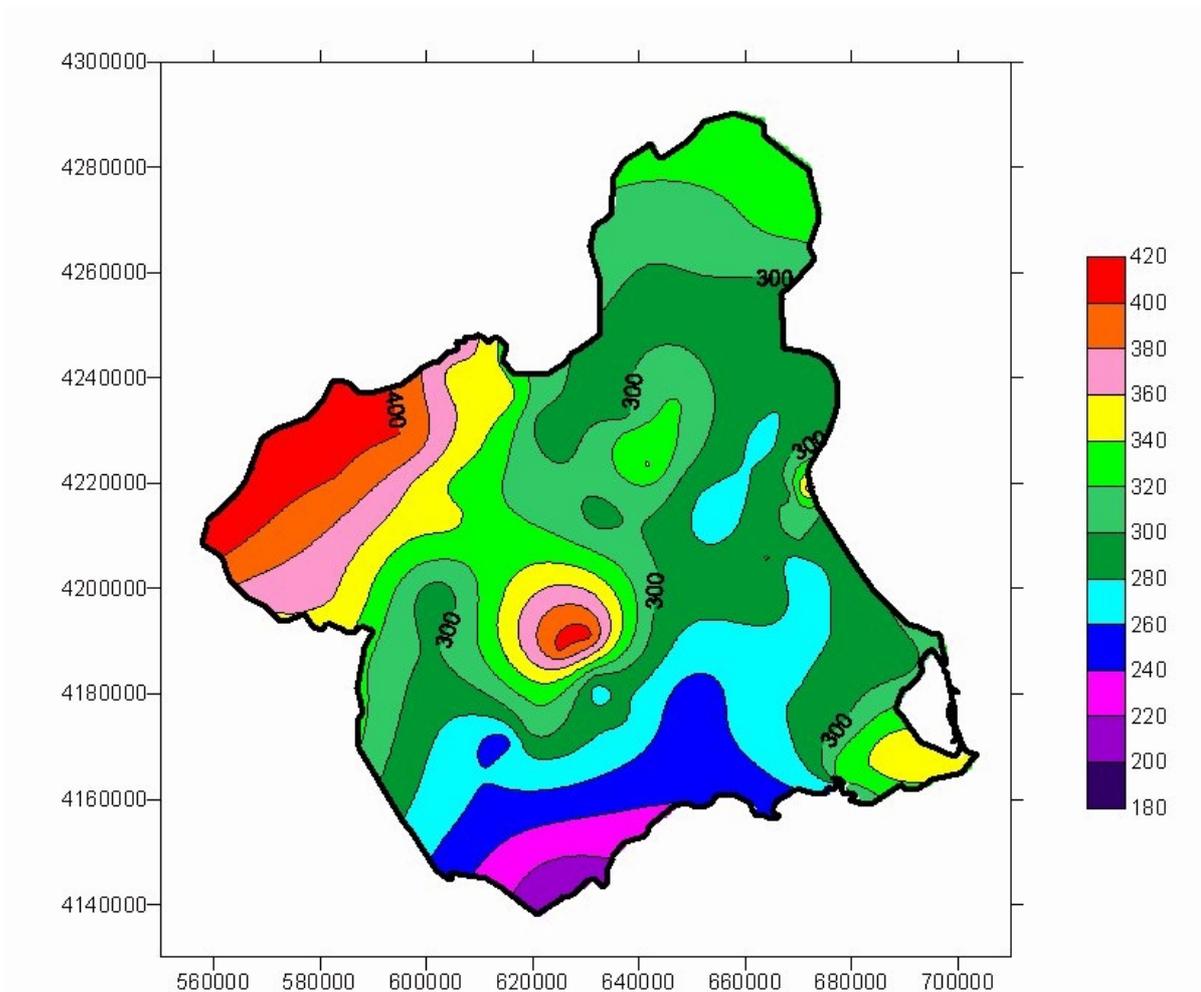


Figura 34. Mapa de la ETR (en mm) sobre la Comunidad de Murcia(1950-2000).

En este cálculo, la escorrentía correspondiente a valores de precipitación inferiores a 400 mm ha sido ajustada en función del método de Thornthwaite y de Turc. A partir de esta curva de ajuste ha sido calculada la escorrentía total y proyectada cartográficamente mediante MDT. El modelo utilizado aquí ha sido de naturaleza teselar o raster de puntos georeferenciados distribuidos regularmente sobre el territorio. La interpolación de los valores calculados sobre el territorio sin observaciones ha sido el kriging con función de correlaciones espaciales aplicadas mediante el programa Surfer. Finalmente, la obtención de los valores promedios regionales ha sido calculada mediante la computación de matrices o álgebra de mapas efectuada a través del SIG-IDRISI. Tales valores son los que figuran en la base cartográfica elaborada como mapa de la escorrentía total media anual en mm sobre el territorio de la Comunidad Autónoma de Murcia (Figura 35).

Este mapa viene a mostrar la gran limitación de los recursos hídricos disponibles sobre la región. En su mayor parte el territorio está por debajo de los 10 mm de escorrentía media

anual y tan solo en dos áreas se sobrepasa claramente. La primera está situada sobre las Sierras Occidentales, cabeceras de los ríos Segura y Mundo, mientras que la segunda corresponde al macizo de Sierra Espuña. La escorrentía media anual se sitúa sobre los 8.61 mm, valor muy inferior a los 212 mm de media española. Ello es consecuencia de los bajos coeficientes de escorrentía regionales, 11 % frente al 60 % que se obtienen en las cuencas septentrionales de España. Globalmente y sobre los 11.314 Km² del territorio Murciano suponen tan solo 97.5 Hm³ anuales de recursos hídricos propios.

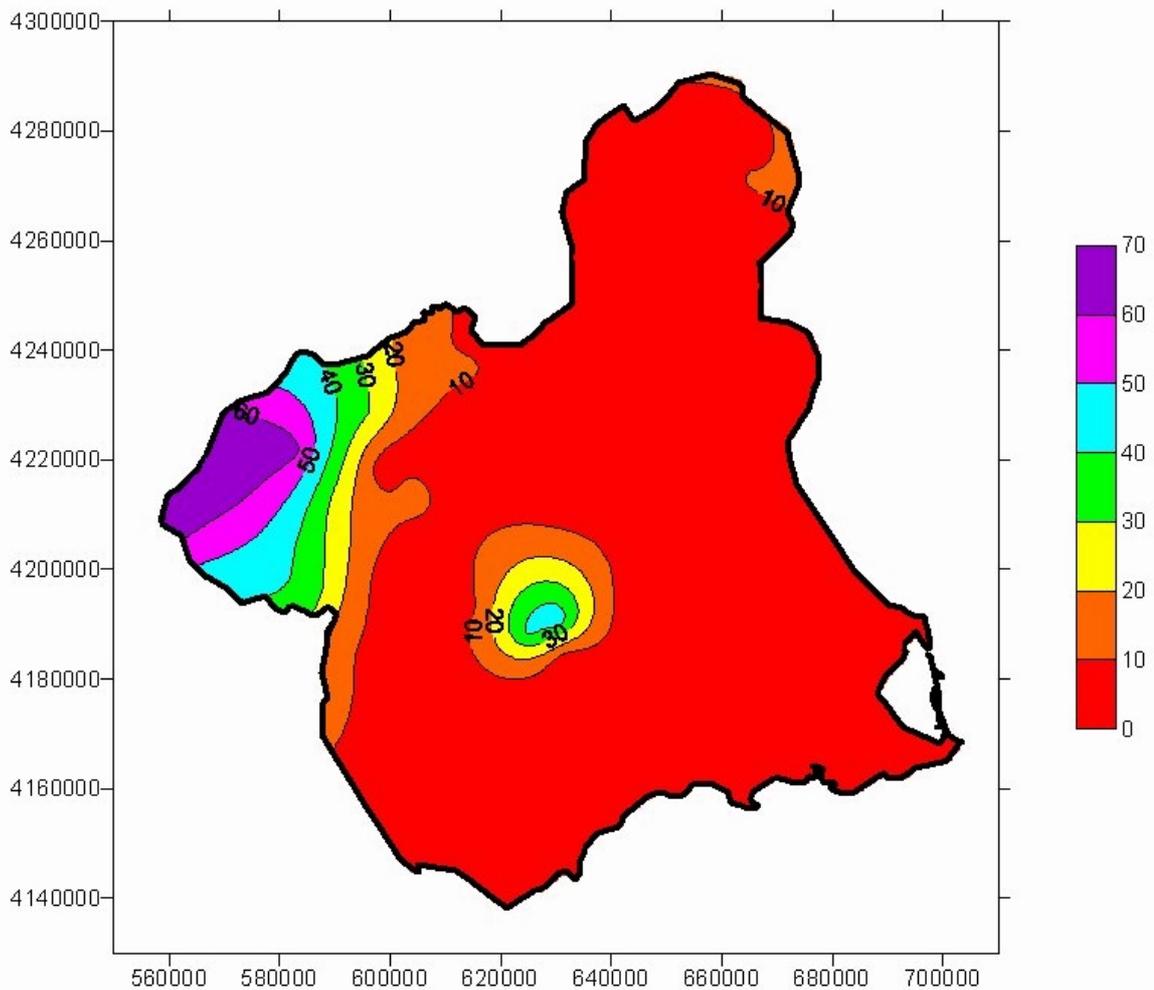


Figura 35. Escorrentías totales medias (mm) sobre la Región de Murcia (1950-2000).

A partir de estos datos hemos procedido a estimar cual sería el impacto que sobre los recursos hídricos de la Región de Murcia tendría la variación termoplumiométrica prevista en los dos escenarios climáticos desarrollados. Para esta estimación se ha utilizado la función regional que relaciona la escorrentía anual según métodos de Thornthwaite y Turc (Fig. 30) con el coeficiente P/T. Como muestra la figura 36 el ajuste con un valor de R² superior al 0.95

es muy aceptable. En cualquier caso, los resultados mostraban una mejor validación con la realidad a los obtenidos mediante la ley de Budiko (BUDIKO, 1961) utilizada en el Plan Hidrológico Nacional.

VI.3. El escenario climático en el horizonte del año 2050, bajo el aumento térmico de 0.5 °C, y su impacto sobre la escorrentía total.

A medida que las condiciones climáticas se van alterando su principal repercusión se produce sobre el ciclo hidrológico. En este sentido, el mapa de la figura 36 representa las magnitudes de escorrentía que cubrirían el territorio de Murcia bajo condiciones de un aumento térmico de medio grado centígrado y una sostenibilidad de las precipitaciones en los valores medios actuales. Este impacto, tal y como muestra la figura 36, equivale a una reducción del 15 % en los recursos hídricos y paralelamente reflejan el aumento de las evapotranspiraciones en todas las ocasiones en que tal escenario térmico se produce. La escorrentía media anual se sitúa en 7.41 mm.

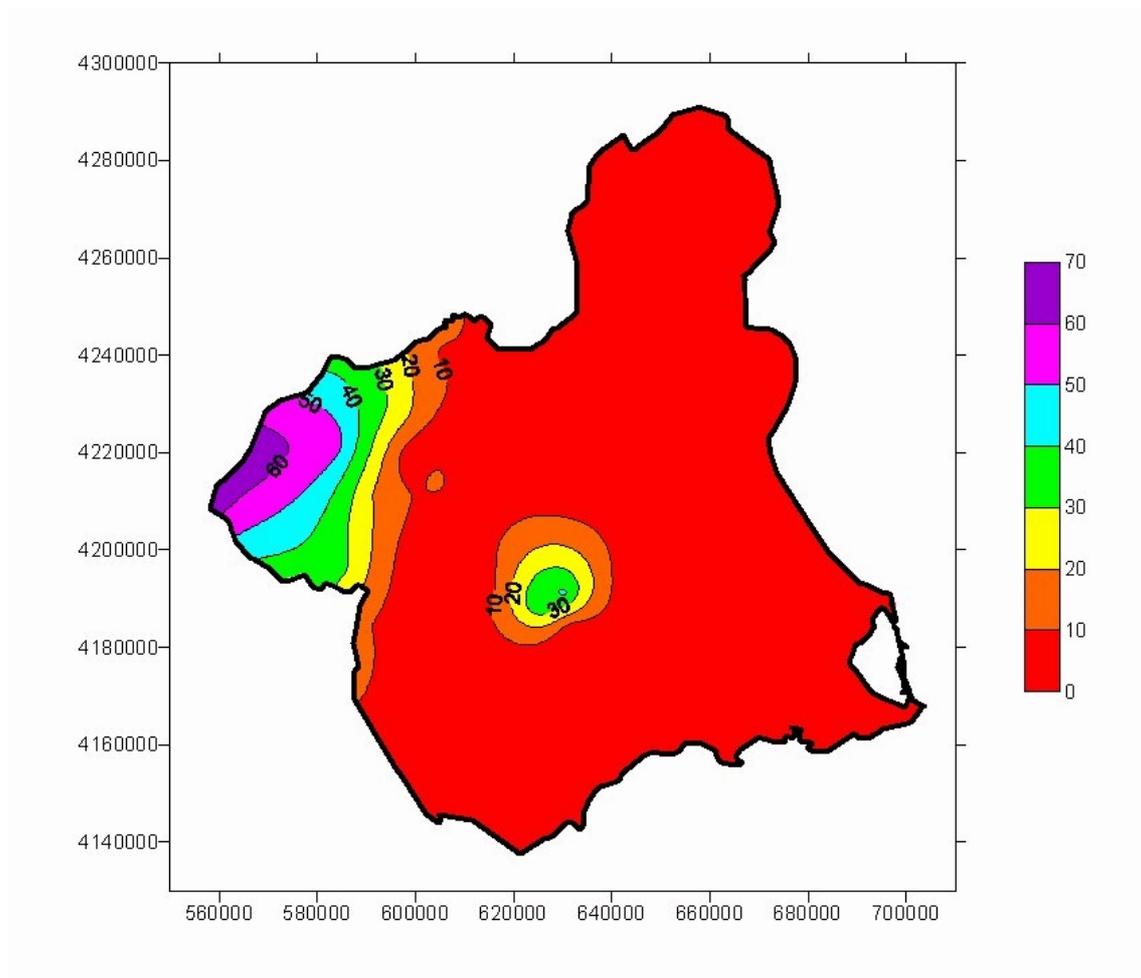


Figura 36. Mapa de escorrentías previsto en el horizonte del año 2050 y en el escenario climático I.

VI.4. El escenario climático en el horizonte del año 2050, bajo el aumento térmico de 0.5 °C, y una reducción del 5% en el volumen de sus precipitaciones.

Viene a determinar el impacto más severo sobre el ciclo hidrológico y los recursos hídricos de la Región de Murcia. El 85 % del territorio de la región estaría por debajo de los 10 mm de escorrentía total anual. Regionalmente ello supondría una reducción en los recursos hídricos propios de hasta un 40 % de los actuales valores que quedarían reducidos a tan solo 5 mm (Figura 37).

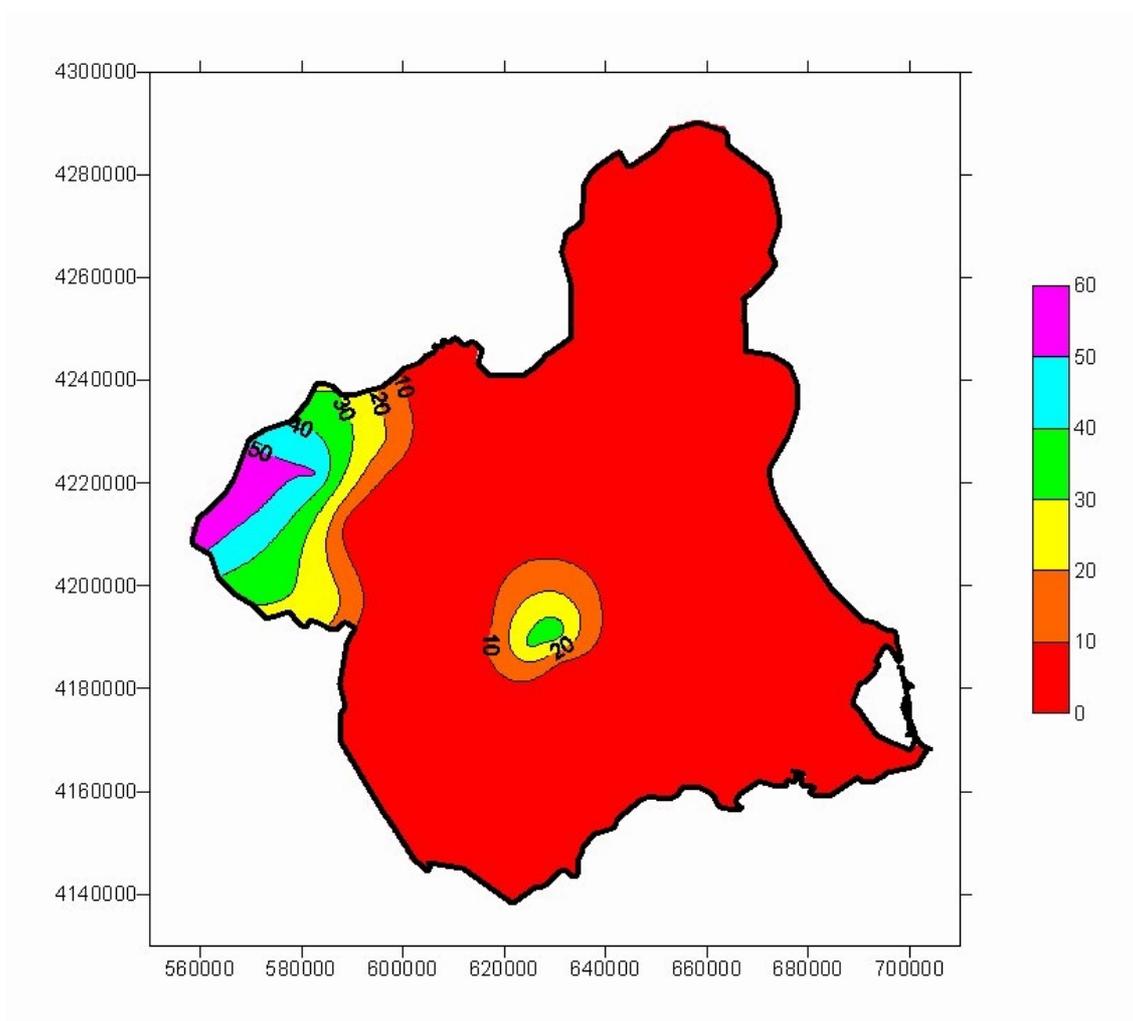


Figura 37. Mapa de escorrentías previsto en el horizonte del año 2050 y en el escenario climático II..

VII. Conclusiones.

El objetivo del presente informe ha sido el de analizar y proyectar los impactos que un cambio climático podría tener sobre el territorio de la Comunidad de Murcia. Un objetivo de gran trascendencia a tenor de las actuales predicciones que los modelos desarrollados establecen sobre nuestra región. En síntesis, la Región Mediterránea, en el borde meridional de la zona templada, entre los 35° N y los 45° N, podría estar abocada, según estos modelos, a experimentar impactos climáticos y biogeográficos de gran intensidad. En consecuencia, a lo largo del siglo XXI, se podría asistir a una sensible readaptación de su escenario biogeográfico. Éste, no sólo se vería afectado por el aumento general de las temperaturas sino que muy especialmente asistiría a una sensible reducción de sus recursos hídricos tanto por la disminución de precipitaciones como por el aumento de las evapotranspiraciones.

En consecuencia, nuestro estudio ha tratado inicialmente de analizar una cuestión básica ¿Se están cumpliendo ya esos escenarios previstos por los modelos sobre la región mediterránea española? Ésta es propiamente la cuestión o reto científico que tiene ante sí la Climatología mediterránea: *¿Están ascendiendo las temperaturas?*, *¿Están disminuyendo las precipitaciones de la región mediterránea?*, en síntesis, *¿Está cambiando el clima mediterráneo?*

Ciertamente que hoy no es posible responder de modo enteramente satisfactorio a estas inquietantes cuestiones. Nuestro actual conocimiento de la dinámica atmosférica general y regional es insuficiente para afrontar con garantía este reto científico. Sin embargo, y siempre desde un punto de vista climatológico, es lícito que a partir de nuestro actual conocimiento del *cómo* evoluciona el clima mediterráneo, podamos interrogarnos por el *hacia donde* se dirige. Es decir, el remontarnos desde el *terminus ad quo* actual hasta el *terminus ad quem* futuro.

Un escenario que, en lo concerniente al valor térmico, no parece mostrar ese notable calentamiento previsto en los modelos. Ello sin menoscabo de que la evolución de la temperatura media anual a partir de las series disponibles de los observatorios del Mediterráneo español, regiones de Valencia y de Murcia, ponga de manifiesto una significativa tendencia de calentamiento climático. Esta tendencia media regional, alcanza valores de 0'45 °C para los años 1950-2000. Sin embargo, como hemos visto, los diferentes valores entre observatorios urbanos y rurales y las diferencias de comportamiento entre el acusado ascenso de las temperaturas mínimas y el sostenimiento de las temperaturas máximas, sugieren una heterogeneidad de calentamiento y ciertas dudas sobre su verdadera naturaleza. De este modo, en el actual estado de las investigaciones, resulta prudente

considerar la posibilidad de que la verdadera “elevación natural” de la temperatura, de existir realmente, corregida del efecto urbanización, pudiese ser mucho más reducida que ese 0’4 °C y simultáneamente vinculada a variaciones cíclicas de la radiación solar u otros factores.

No obstante, las mayores inquietudes de nuestro escenario climático próximo se centran en la posibilidad de estar asistiendo a una disminución pluviométrica. De ahí que hayamos tratado en nuestro estudio de detectar la existencia de alguna señal climática de sequía ya en consonancia con lo previsto en los modelos. ¿La zona mediterránea está ya siendo afectada por una significativa reducción de las lluvias? En este sentido, la compleja cadena de tratamiento estadístico aplicado a las series pluviométricas a lo largo del periodo 1950-2000, ha permitido mostrar la tendencia de las precipitaciones de las Región de Murcia y Alicante. La regresión lineal permite estimar que el valor de descenso pluviométrico ha sido de -0’6 mm/año. Es decir una disminución de unos 30 mm a lo largo de la segunda mitad del siglo XX.

A pesar de ello, esta tendencia es realmente débil y, en todo caso, sin significación estadística ya que no se aleja de la variabilidad natural de las precipitaciones. Razón por la cual la evolución pluviométrica secular a lo largo de todo el siglo XX de la Región de Murcia y Alicante no muestra tendencia alguna. En síntesis, y a pesar de la severidad de las sequías padecidas durante la última década del siglo XX, la tendencia secular a lo largo de todo el siglo XX no muestra valores de disminución pluviométrica. Nada parece fuera de la variabilidad natural y de la característica alternancia de ciclos secos y ciclos húmedos. En definitiva un comportamiento que no permite rechazar en el momento actual la hipótesis de la "estabilidad" climática en el Mediterráneo español. Una hipótesis ciertamente enfrentada a las previsiones de los actuales modelos teóricos sobre el cambio climático. Previsiones cuya velocidad de "ejecución" en los horizontes de los años 2025-2050 nos hace en todo caso muy expectantes del comportamiento climático en los años inmediatos.

A tenor de todos estos análisis nuestras conclusiones sobre las consecuencias de un posible cambio climático sobre la Región de Murcia no descartan la posibilidad de un sostenimiento climático dentro de la variabilidad natural de nuestro clima. No obstante, con las incertidumbres expresadas y ante la gran sensibilidad que los recursos hídricos muestran frente a las variaciones climáticas, hemos realizado una proyección sobre las tendencias termopluviométricas más severas observadas durante el siglo XX. En el horizonte más adverso de estos escenarios, el impacto sobre los recursos hídricos podría revestir una notable

gravedad al convertir el territorio de Murcia en una auténtica zona de clima desértico con reducción de hasta un 40 % de las actuales escorrentías.

Esta gravedad de situación en cuanto a los recursos hídricos vendría además intensificada por la situación de los recursos globales de la Cuenca del río Segura. En efecto, extrapolando el impacto sufrido por la escorrentía en las altas tierras occidentales del macizo de Revolcadores sobre la isoyeta de 450 mm anuales a todo el territorio de la Cuenca del río Segura, 19.034 Km², la reducción de recursos hídricos podría alcanzar hasta un 31 % de los actuales en el escenario más severo de los proyectados. Es decir que los 1.000 Hm³ de recursos hidráulicos propios que se estiman en el Plan Hidrológico de Cuenca experimentarían una merma de magnitud notablemente superior a la estimada en el Plan Hidrológico Nacional en la horquilla del 6-13 %. Con ello la actual dotación de aportes externos planificada, 1050 Hm³ año, no podría cubrir y atender las demandas planteadas. En síntesis, la gran sensibilidad del sistema hidrológico a los posibles efectos de un cambio climático, muestra el enorme interés que adquiere la adopción de las políticas de ahorro y gestión ante las demandas futuras.

Referencias bibliográficas.

ALMARZA, C. (1984). “Fichas hídricas normalizadas y otros parámetros hidrometeorológicos”, INM, 3 vols.

ALEXANDERSSON, H. (1986). “A homogeneity test applied to precipitation data”. *International Journal of Climatology*, 6, pp. 661-675.

ALEXANDERSSON, H. and MOBERG, A. (1997). “Homogenization of swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends”. *International Journal of Climatology*, 17, pp. 25-34.

ANDRÉ, J-C., ROYER, J., (1999) “Fluctuations à court terme du climat et l'interprétation des observations recentes en termes d'effet de serre”, *La Météorologie*, 8^a, série, 28, 12-22.

AYALA-CARCEDO, J. e IGLESIAS, A. (2000). «Impactos del posible cambio climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España Peninsular” BBVA, Servicio de estudios.

BARNOLA, J. M., RAYNAUD, D., LORIUS, C. and KOROTKEVICH, Y. S. (1994). “Historical CO₂ record from the Vostok ice core”. pp. 7-10. En T. A. BODEN, D. P.

KAISER, R. J. SEPANSKI, and F. W. STOSS (eds.) "*Trends'93: A Compendium of Data on Global Change*". ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn, U.S.A.

BARRET, E. C. (1976). "Cloud and thunder". "*The Climate of the British Isles*". London, pp.144-1200.

BIGG, G. R. (1993). "After Rio: The United Nations Framework Convention on Climate Change". *Weather*, 48, 11, pp. 381-384.

BODEN, D. P. KAISER, R. J. SEPANSKI, and F. W. STOSS (eds.) "*Trends'93: A Compendium of Data on Global Change*". ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn, U.S.A.

CERDÁ CERDA, A. (2003). "*Prologo*", en Seguimiento y evaluación de los efectos sobre el medio natural de la sequía y los procesos erosivos en la Región de Murcia.

CHAPPELLAZ, J. A., BARNOLA, J. M., RAYNAUD, D., KOROTKEVICH, Y. S. and LORIUS, C. (1994). pp. 229-232. En T. A. BODEN, D. P. KAISER, R. J. SEPANSKI and F. W. STOSS (eds.), "*Trends '93: A compendium of data on Global Change*". ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U. S. A.

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA (1999). Plan Hidrológico de Cuenca del Júcar..

DANNI HARVEY, L. D. (1989). "Managing atmospheric CO₂". *Climatic Change*, 15, 3, pp. 343-382.

EFIMOVA, N. A. (1987). "Change in moisture conditions in part of Eurasia with a possible global warming of the climate" *Soviet Meteorology*, 11, pp. 14-18.

ELLIOTT, W. P. (1983). "A note on the historical industrial production of carbon dioxide". *Climatic Change*, 5, 2, p. 141-144.

DANNI HARVEY, L. D. (1989). "Managing atmospheric CO₂". *Climatic Change*, 15, 3, pp. 343-382.

FLOHN, H. (1979). "Notre avenir climatique: un Ocean Artique libre de glaces?". *La Météorologie*, VI, 16, pp. 35-51.

GAUDRY, A., MONFRAY, P., BONSSANG, G., KAZAN, V., POLIAN, G. and LAMBERT, G. (1994). "Atmospheric CO₂ record from in situ measurements at Amsterdam Island". pp. 131-134. En T. A. BODEN, D. P. KAISER, R. J. SEPANSKI and F. W. STOSS (eds.), "*Trends '93: A compendium of data on Global Change*". ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U. S. A.

HENDERSON-SELLERS, A. (1986). "Cloud changes in a warmer Europe". *Climatic Change*, 8, 1, pp. 25-52.

HENDERSON-SELLERS, A. (1986). "Increasing cloud in a warming world". *Climatic Change*, 9, 3, pp. 267-310.

HENDERSON-SELLERS, A. and GORNITZ, V. (1984). "Possible climatic impacts of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation". *Climatic Change*, 6, 3, p. 231-258.

HULME, M. (1994). "Century-scale time series of regional rainfall anomalies in Africa". pp 964-973. En T. A. BODEN, D. P. KAISER, R.J. SEPANSKI and F. W. STOSS (eds.), "*Trends '93: A compendium of data on global change*". ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn. U.S.A.

INGRAM, W. J. (1989). "Modelling cloud feedbacks on climate change". *Weather*, 44, 7, pp. 303-311.

IPCC (1992). "*Climate Change: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*", J. T. HOUGHTON, B. A. CALLENDER and S. K. VARNEY (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 198 pp.

IPCC Working Group I Third Assessment Report (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Draft version in <http://www.gcrio.org/online.html>. 18 pp.

IPCC (1996). "*Climate Change 1995: The Science of Climate Change: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*". J. J. HOUGHTON, L.G. MEIRO FILHO, B. A. CALLANDER, N. HARRIS, A. KATTENBERG AND K. MASKELL (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 584 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (1990). “*Climate Change: the IPCC Scientific Assessment*”, J. T. HOUGHTON, G. J. JENKINS and J. J. EPHRAUMS (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, UK, 365 pp.

IPCC. (1990b). “*Scientific assessment of climatic change*”. Report prepared by the IPCC by the Working Group I, Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC Working Group I Third Assessment Report (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Draft version in <http://www.gcric.org/online.html>. 18 pp.

ISAKSEN, I. S. A. and HOV, O. (1987). “Calculations of trends in the tropospheric concentration of O₃, OH, CO, CH₄ and NO”. *Tellus*, 39B, pp.271-285.

JONES, P. D. (1994a). “Hemispheric surface air temperatures variations: a reanalysis and an update to 1993”. *Journal of Climate*, 7, pp. 1794-1802.

JONES, P. D. (1994b). “Recent warming in global temperature series”. *Geophysical Research Letters*, 21, pp. 1149-1152.

JONES, P. D., RAPER, S. C. B., and WIGLEY, T. M. L. (1986). “Southern hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984”. *Journal of Climate And Applied Meteorology*, 25, 9, pp 1213-1230.

JONES, P. D., RAPER, S. C. B., BRADLEY, R. S., DIAZ, H. F., KELLY, P. M. and WIGLEY, T. M. L. (1986). “Northern hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984”. *Journal Of Climate and Applied Meteorology*, 25, 2, pp 161-179.

JONES, P. D., RAPER, S. C. B., CHERRY, B. S. G., GOODESS, C. M., WIGLEY, T. M. L., SANTER, B. and KELLY, P. M. (1991). “*An updated global grid point surface air temperature anomaly data set: 1851-1990*”. Data set electrónica NDP-020 suministrada por el Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, Tennessee, USA.

JONES, P. D. (1996). “1995-The warmest year on record (so far)”. Draft Press Release for January 1996. Web Homepage of the Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, England.

JONES, P.D., PARKER, D.E., OSBORN, T.J., and BRIFFA, K.R. (2000). Global and hemispheric temperature anomalies--land and marine instrumental records. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.

JOUZEL, J., LORIUS, C., PETIT, J. R., BARKOV, N. I. and KOTLYAKOV, V. M. (1994). "Vostok isotopic temperature record". pp. 590-602. En T. A. BODEN, D. P. KAISER, R. J. SEPANSKI, and F. W. STOSS (eds.) "*Trends'93: A Compendium of Data on Global Change*". ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn, U.S.A.

JOUZEL, J., LORIUS, C., PETIT, J. R., GENTHON, C., BARKOV, N. I., KOTLYAKOV, V. M. and PETROV, V. M. (1987). "Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years)". *Nature*, 329, pp. 403-408.

KHALIL, M. A. K. and RASMUSEN, R. A. (1989). "Climate induced feedbacks for the global cycles of methane and nitrous oxide". *Tellus*, 41B, pp.554-559.

LABEYRIE, J. (1987). "*El hombre y el clima*". Colección Límites de la Ciencia, Ed. Gedisa, 245 pp.

MARLAND, G. and ROTTY, R. M. (1984). "Carbon dioxide emissions from fossil fuels: a procedure for estimation and results for 1950-1982". *Tellus*, 36B, 4, pp 232-261.

MARLAND, G., BODEN, T. A. and ANDRES, B. (2000). "Regional CO₂ Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-1997". *NDP-030*, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.

MARLAND, G., BODEN, T. A. and ANDRES, R. J. (2000). "Global CO₂ Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-1997". *NDP-030*, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.

MARLAND, G., BODEN, T. A. and ANDRES, R. J. (2000). "National CO₂ Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-1997". *NDP-030*, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.

MIMAM (2000). *El libro Blanco del Agua en España*, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, 637 pp.

MIMAM (2001). *Plan Hidrológico Nacional*, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, 5 vols,

PARRY et al. (1999) Informe ACACIA, (Projet: A Cocertated Action Towards a Comprehensive Climate Impacts and Adaptations Assessment for the European Union).

QUEREDA SALA, J. y MONTÓN CHIVA, E. (1996). "Dióxido de carbono y clima en el litoral mediterráneo". *Investigaciones geográficas*, nº 16, pp. 5-20. Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante, Alicante.

QUEREDA SALA, J., GIL OLCINA, A., OLCINA CANTOS, J., RICO AMORÓS, A. MONTÓN CHIVA, E. and ESCRIG BARBERÁ, J. (2000). "Le réchauffement climatique à l'Espagne". *La Météorologie*, 32, pp. 40-46. Societé M. de France, Paris.

QUEREDA SALA, J., GIL OLCINA, A., PÉREZ CUEVA, A., OLCINA CANTOS, J., RICO AMORÓS, A. and MONTÓN CHIVA, E. (2000). "Climatic warming in the Spanish Mediterranean: Natural Trend or Urban effect", *Climatic Change*, 46, 4. Univ. de Standford, Kluwer Academic.

RAMANATHAN, V., CESS, R. D., HARRISON, E. F., MINNIS, P., BARKSTROM, B. R., AHMAD, E. and HARTMANN, D. (1989). "Cloud-radiative forcing and climate: results from the Earth Radiation Budget Experiment". *Science*, 243, pp. 57-63.

ROSENBERG, N. J. (1982). "The increasing CO₂ concentrations in the atmosphere and its implication on agricultural productivity II. Effects through CO₂-induced climatic change". *Climatic Change*, 4, 3, pp. 239-254.

SMITH, T. M., LEEMANS, R. and SHUGART H. H. (1992). "Sensitivity of terrestrial carbon storage to CO₂-induced climate changes: comparison of four scenarios based on G.C.M." *Climatic Change*, 21, 4, pp.367-384.

SPANGLER, W. M. and JENNE, R. L. (1999). "Daily and Monthly Lat-lon Sea Level Pressure Grids (Northern Hemisphere, Jan 1899 to current)". Dataset 010.0, Data Support Section. Scientific Computing Division. National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado.

TANS, P. P., FUNG, I. Y. and TAKAHASHI, T. (1990). "Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget". *Science*, Vol. 247, pp. 1431-1438.

TAYLOR, N. K. (1992). "The rôle of the ocean in the global carbon cycle. Part 1: The marine carbon pumps". *Weather*, 47, 5, pp. 146-151.

THORNTHWAITE, C.W. (1948). *Micrometeorology of the surface layer of the atmosphere. Public. Climat.* 1 bis, 5.

THORNTHWAITE, C.W. (1948). "An approach toward a rational classification of climate". *Geographical Review*: 55-94.

THORNTHWAITE, C.W. and MATHER, J.R. (1955). The water balance. Publications in Climatology 8 (1). Laboratory of Climatology. Centerton, N.J.

TURC, L. (1961). "Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle". *Ann. Agron.*, pp.13-49.

VINNIKOV, K. Ya, GROISMAN, P. Ya and LUGINA, K. M. (1994). "Global and hemispheric temperature anomalies from instrumental surface air temperature records". pp. 615-627. En T. A.

VINNIKOV, K. Ya. et al. (1987). "Mean Air Temperature variations of the Northern Hemisphere for 1841-1985". *Soviet Meteorology*, 1, pp. 37-45.

VONDER HAAR, T. H. and OORT, A. H. (1973). "New estimate of annual poleward energy transport by Northern Hemisphere oceans", *J. of Phys. Oceano.*, 3, pp. 169-172.

WILSON, H. and HANSEN, J. (1994). "Global and hemispheric temperature anomalies from instrumental surface air temperature records". pp. 609-614. En T. A. BODEN, D. P. KAISER, R. J. SEPANSKI, and F. W. STOSS (eds.) "*Trends'93: A Compendium of Data on Global Change*". ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn, U.S.A.

WOODWELL, G. M. (1989). "The Warming of the Industrialized Middle Latitudes 1985-2050: Causes and Consequences and Policy Responses". *Climatic Change*, 15, 1-2, pp. 31-50.