

# Guía de prácticas climatológicas

Edición de 2018

TIEMPO CLIMA AGUA



ORGANIZACIÓN  
METEOROLÓGICA  
MUNDIAL

OMM-N° 100



# Guía de prácticas climatológicas

Edición de 2018



ORGANIZACIÓN  
METEOROLÓGICA  
MUNDIAL

OMM-N° 100

#### NOTA DE LA EDICIÓN

METEOTERM, base terminológica de la OMM, está disponible en la página web: <http://public.wmo.int/es/recursos/meteoterm>.

Conviene informar al lector de que cuando copie un hipervínculo seleccionándolo del texto podrán aparecer espacios adicionales inmediatamente después de [http://](#), [https://](#), [ftp://](#), [mailto:](#), y después de las barras (/), los guiones (-), los puntos (.) y las secuencias ininterrumpidas de caracteres (letras y números). Es necesario suprimir esos espacios de la dirección URL copiada. La dirección URL correcta aparece cuando se pone el cursor sobre el enlace o cuando se hace clic en el enlace y luego se copia en el navegador.

OMM-N° 100

© Organización Meteorológica Mundial, 2018

La OMM se reserva el derecho de publicación en forma impresa, electrónica o de otro tipo y en cualquier idioma. Pueden reproducirse pasajes breves de las publicaciones de la OMM sin autorización siempre que se indique claramente la fuente completa. La correspondencia editorial, así como todas las solicitudes para publicar, reproducir o traducir la presente publicación parcial o totalmente deberán dirigirse al:

Presidente de la Junta de Publicaciones  
Organización Meteorológica Mundial (OMM)

7 bis, avenue de la Paix  
Case postale N° 2300  
CH-1211 Genève 2, Suiza

Tel.: +41 (0) 22 730 84 03

Fax: +41 (0) 22 730 81 17

Correo electrónico: [publications@wmo.int](mailto:publications@wmo.int)

ISBN 978-92-63-30100-0

#### NOTA

Las denominaciones empleadas en las publicaciones de la OMM y la forma en que aparecen presentados los datos que contienen no entrañan, de parte de la Organización, juicio alguno sobre la condición jurídica de ninguno de los países, territorios, ciudades o zonas citados o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

La mención de determinados productos o sociedades mercantiles no implica que la OMM los favorezca o recomiende con preferencia a otros análogos que no se mencionan ni se anuncian.



## REGISTRO DE REVISIÓN DE LA PUBLICACIÓN

[illegible]



# ÍNDICE

Página

|                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| REGISTRO DE REVISIÓN DE LA PUBLICACIÓN .....                                     | iii       |
| PREFACIO .....                                                                   | ix        |
| <b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>                                            | <b>1</b>  |
| 1.1 Finalidad y contenido de la guía .....                                       | 1         |
| 1.2 Climatología .....                                                           | 1         |
| 1.2.1 Historia .....                                                             | 2         |
| 1.2.2 El sistema climático .....                                                 | 3         |
| 1.2.3 Usos de la información e investigación climatológicas .....                | 6         |
| 1.3 Programas internacionales sobre el clima .....                               | 8         |
| 1.4 Actividades climáticas a escala mundial y regional .....                     | 8         |
| 1.5 Actividades climáticas a escala nacional .....                               | 10        |
| 1.6 Gestión de la calidad .....                                                  | 12        |
| Referencias .....                                                                | 14        |
| <b>CAPÍTULO 2. OBSERVACIONES, ESTACIONES Y REDES CLIMÁTICAS .....</b>            | <b>16</b> |
| 2.1 Introducción .....                                                           | 16        |
| 2.2 Elementos climáticos .....                                                   | 17        |
| 2.2.1 Elementos de la superficie y la subsuperficie .....                        | 17        |
| 2.2.2 Elementos en altitud .....                                                 | 20        |
| 2.2.3 Elementos medidos por teledetección .....                                  | 22        |
| 2.3 Instrumentos .....                                                           | 22        |
| 2.3.1 Equipo de superficie básico .....                                          | 23        |
| 2.3.2 Instrumentos de observación en altitud .....                               | 25        |
| 2.3.3 Teledetección en superficie .....                                          | 25        |
| 2.3.4 Teledetección desde aeronaves y por satélite .....                         | 26        |
| 2.3.5 Calibración de instrumentos .....                                          | 29        |
| 2.4 Emplazamiento de las estaciones climatológicas .....                         | 30        |
| 2.5 Diseño de las redes climatológicas .....                                     | 32        |
| 2.6 Funcionamiento de las estaciones y las redes .....                           | 33        |
| 2.6.1 Horas de observación .....                                                 | 33        |
| 2.6.2 Registro y comunicación de las observaciones .....                         | 34        |
| 2.6.3 Control de calidad <i>in situ</i> .....                                    | 35        |
| 2.6.4 Funciones generales de los observadores .....                              | 35        |
| 2.6.5 Formación de los observadores .....                                        | 36        |
| 2.6.6 Inspección de las estaciones .....                                         | 37        |
| 2.6.7 Mantenimiento de la homogeneidad de los datos .....                        | 37        |
| 2.6.8 Verificación de los informes en los centros de recopilación de datos ..... | 38        |
| 2.6.9 Documentación y metadatos de las estaciones .....                          | 38        |
| Referencias .....                                                                | 41        |
| <b>CAPÍTULO 3. GESTIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS .....</b>                             | <b>44</b> |
| 3.1 Introducción .....                                                           | 44        |
| 3.2 Importancia y finalidad de la gestión de datos .....                         | 45        |
| 3.2.1 Diseño de un sistema de gestión de datos climáticos .....                  | 46        |
| 3.2.2 Adquisición de datos en el CDMS .....                                      | 48        |
| 3.2.3 Documentación de datos del CDMS .....                                      | 49        |
| 3.2.4 Almacenamiento de datos del CDMS .....                                     | 50        |
| 3.2.5 Consulta y recuperación de datos del CDMS .....                            | 51        |
| 3.2.6 Archivos del CDMS .....                                                    | 52        |
| 3.2.7 Seguridad del CDMS .....                                                   | 52        |
| 3.2.8 Gestión del CDMS .....                                                     | 53        |

|       |                                                                            |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.9 | Normas y directrices aplicables a los CDMS a nivel internacional . . . . . | 53 |
| 3.3   | Control de calidad . . . . .                                               | 54 |
| 3.3.1 | Procedimientos de control de calidad . . . . .                             | 55 |
| 3.3.2 | Documentación relativa al control de calidad . . . . .                     | 57 |
| 3.3.3 | Tipos de error . . . . .                                                   | 57 |
| 3.3.4 | Pruebas de formato . . . . .                                               | 57 |
| 3.3.5 | Pruebas de completitud de datos . . . . .                                  | 58 |
| 3.3.6 | Pruebas de coherencia . . . . .                                            | 58 |
| 3.3.7 | Pruebas de tolerancia . . . . .                                            | 59 |
| 3.4   | Intercambio de datos climáticos . . . . .                                  | 60 |
| 3.5   | Rescate de datos . . . . .                                                 | 62 |
|       | Referencias . . . . .                                                      | 65 |

#### **CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA A PARTIR DE CONJUNTOS DE DATOS . . . . . 66**

|       |                                                                    |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1   | Introducción . . . . .                                             | 66 |
| 4.2   | Evaluación de los conjuntos de datos . . . . .                     | 66 |
| 4.3   | Visualización cualitativa de los datos . . . . .                   | 67 |
| 4.4   | Descriptores cuantitativos sumarios de datos . . . . .             | 69 |
| 4.4.1 | Modelización de datos de la distribución de frecuencias . . . . .  | 70 |
| 4.4.2 | Medidas de tendencia central . . . . .                             | 76 |
| 4.4.3 | Medidas de variabilidad . . . . .                                  | 78 |
| 4.4.4 | Medida de la simetría . . . . .                                    | 79 |
| 4.4.5 | Medida del apuntamiento . . . . .                                  | 80 |
| 4.4.6 | Índices . . . . .                                                  | 80 |
| 4.5   | Correlación . . . . .                                              | 81 |
| 4.5.1 | Tablas de contingencia . . . . .                                   | 81 |
| 4.5.2 | Medidas de correlación . . . . .                                   | 81 |
| 4.6   | Series temporales . . . . .                                        | 82 |
| 4.7   | Interpretación de las características sumarias del clima . . . . . | 83 |
| 4.8   | Normales . . . . .                                                 | 85 |
| 4.8.1 | Período de cálculo . . . . .                                       | 85 |
| 4.8.2 | Estaciones para las que se calculan normales y promedios . . . . . | 86 |
| 4.8.3 | Homogeneidad de los datos . . . . .                                | 86 |
| 4.8.4 | Datos faltantes . . . . .                                          | 87 |
| 4.8.5 | Temperatura media diaria . . . . .                                 | 87 |
| 4.8.6 | Quintiles de precipitación . . . . .                               | 88 |
|       | Referencias . . . . .                                              | 89 |

#### **CAPÍTULO 5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA ANALIZAR CONJUNTOS DE DATOS. . . . . 90**

|        |                                                                      |     |
|--------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1    | Introducción . . . . .                                               | 90  |
| 5.2    | Homogeneización . . . . .                                            | 90  |
| 5.2.1  | Evaluación de los datos homogeneizados . . . . .                     | 95  |
| 5.3    | Ajuste de modelos para evaluar las distribuciones de datos . . . . . | 95  |
| 5.4    | Transformación de datos . . . . .                                    | 96  |
| 5.5    | Análisis de series temporales . . . . .                              | 97  |
| 5.6    | Análisis de múltiples variables . . . . .                            | 98  |
| 5.7    | Análisis comparativos . . . . .                                      | 100 |
| 5.8    | Suavizamiento . . . . .                                              | 101 |
| 5.9    | Estimación de datos . . . . .                                        | 102 |
| 5.9.1  | Métodos de estimación matemáticos . . . . .                          | 103 |
| 5.9.2  | Estimación basada en relaciones físicas . . . . .                    | 103 |
| 5.9.3  | Métodos de estimación espaciales . . . . .                           | 104 |
| 5.9.4  | Estimación de series temporales . . . . .                            | 105 |
| 5.9.5  | Validación . . . . .                                                 | 105 |
| 5.10   | Análisis de valores extremos . . . . .                               | 106 |
| 5.10.1 | Método del período de retorno . . . . .                              | 107 |

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.10.2 Precipitación máxima probable .....                               | 107        |
| 5.11 Estadística robusta .....                                           | 108        |
| 5.12 Paquetes estadísticos .....                                         | 108        |
| 5.13 Minería de datos .....                                              | 109        |
| Referencias.....                                                         | 110        |
| <b>CAPÍTULO 6. LOS PRODUCTOS CLIMÁTICOS Y SU DIFUSIÓN .....</b>          | <b>113</b> |
| 6.1 Directrices generales.....                                           | 113        |
| 6.1.1 Publicaciones periódicas sobre los datos climatológicos .....      | 113        |
| 6.1.2 Publicaciones esporádicas .....                                    | 115        |
| 6.1.3 Productos genéricos .....                                          | 115        |
| 6.1.4 Productos especializados .....                                     | 115        |
| 6.1.5 Productos para la vigilancia del clima .....                       | 116        |
| 6.1.6 Índices .....                                                      | 117        |
| 6.2 Datos reticulados .....                                              | 117        |
| 6.2.1 Conjuntos de datos reticulados basados en observaciones .....      | 118        |
| 6.2.2 Conjuntos de datos reticulados basados en modelos climáticos ..... | 122        |
| 6.2.3 Datos retrospectivos .....                                         | 122        |
| 6.1.4. Reanálisis.....                                                   | 123        |
| 6.3 Modelos climáticos y evolución probable del clima .....              | 125        |
| 6.3.1 Productos sobre la evolución probable del clima .....              | 126        |
| 6.3.2 Predicciones y proyecciones climáticas .....                       | 128        |
| 6.3.3 Escenarios climáticos .....                                        | 129        |
| 6.3.4 Modelos climáticos globales .....                                  | 129        |
| 6.3.5 Reducción de escala: modelos climáticos regionales .....           | 130        |
| 6.4 Ejemplos de productos y presentación de datos .....                  | 131        |
| Referencias.....                                                         | 138        |
| <b>CAPÍTULO 7. PRESTACIÓN DE SERVICIOS.....</b>                          | <b>140</b> |
| 7.1 Introducción.....                                                    | 140        |
| 7.2 Usuarios y usos de la información climatológica .....                | 141        |
| 7.3 Interacción con los usuarios .....                                   | 143        |
| 7.4 Información y difusión de los productos y servicios .....            | 146        |
| 7.5 Comercialización de los servicios y productos .....                  | 148        |
| Referencias.....                                                         | 150        |
| <b>ANEXO. ACTIVIDADES CLIMÁTICAS A NIVEL INTERNACIONAL .....</b>         | <b>151</b> |
| Referencias.....                                                         | 156        |



## PREFACIO

Conforme se estipula en el Convenio de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), uno de los propósitos de la Organización consiste en fomentar la normalización de las observaciones meteorológicas y afines, en particular, las que se aplican a las prácticas y los estudios climatológicos. Con tal fin, el Congreso Meteorológico Mundial aprueba periódicamente un Reglamento Técnico en el que se establecen las prácticas y los procedimientos meteorológicos que han de seguir los Miembros de la Organización. El Reglamento Técnico se complementa con un conjunto de guías, que exponen más detalladamente las prácticas, los procedimientos y las especificaciones técnicas que los Miembros deberán seguir o poner en práctica para establecer y llevar a cabo sus actividades de conformidad con el Reglamento Técnico o bien para desarrollar sus servicios meteorológicos y climatológicos. Entre ese conjunto de publicaciones se encuentra la *Guía de prácticas climatológicas* (OMM-Nº 100), cuyo objetivo consiste en poner fácilmente al alcance de todos los interesados en las prácticas climatológicas la información que sea de máxima importancia para una buena realización de su labor. Cabe destacar que esta publicación no constituye una descripción exhaustiva de los fundamentos teóricos ni de las aplicaciones de las técnicas y los métodos climatológicos, aunque sí se hace referencia a documentación relativa a los mismos cuando se considera necesario.

La primera edición de la *Guía de prácticas climatológicas* fue publicada en 1960 fundándose en material elaborado por la Comisión de Climatología y fue editada por un grupo de trabajo especial con la ayuda de la Secretaría. La publicación de la segunda edición de la Guía se decidió en la sexta reunión de la Comisión de Aplicaciones Especiales de la Meteorología y Climatología (1973). Esta solicitó al grupo de trabajo encargado de la Guía que preparara una edición modificada sustancialmente, teniendo en cuenta los progresos alcanzados durante el decenio precedente en climatología y el uso de la información climatológica y los conocimientos sobre diferentes esferas de la meteorología, así como sobre otras disciplinas. La séptima reunión de la Comisión (1978) restableció el mencionado grupo de trabajo, que continuó trabajando en la segunda edición capítulo a capítulo y confeccionó la versión que finalmente fue publicada en 1983. Desde entonces, las actividades relacionadas con el clima han venido expandiéndose prácticamente en todas las esferas de la vida humana, en particular en el ámbito de la ciencia y en las políticas públicas. La *Guía de prácticas climatológicas* es una fuente de referencia clave que tiene por objeto ayudar a los Miembros a ofrecer un flujo continuo de información indispensable para las prácticas y actividades cotidianas de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN).

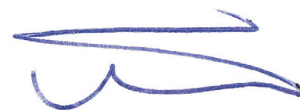
La elaboración de la tercera edición de la presente Guía se inició en 1990, una vez que su contenido y autoría fueron aprobados por el grupo de trabajo consultivo de la Comisión de Climatología durante una reunión celebrada en Norrköping (Suecia). Posteriormente, se estableció un consejo editorial para la Guía encargado de supervisar a los distintos autores principales y a los editores de los capítulos. Sin embargo, los autores principales tuvieron que esperar hasta 1999 para recibir un proyecto de resumen con el fin de seguir elaborando el texto de la Guía. Al año siguiente, el consejo editorial se reunió en Reading (Reino Unido) y especificó el contenido y nuevos detalles de cada capítulo. En 2001, la Comisión de Climatología, en su decimotercera reunión, decidió establecer un Equipo de Expertos sobre la *Guía de prácticas climatológicas* con un mandato bien definido para acelerar el proceso. Si bien la parte I de la publicación estaba disponible en Internet, se necesitaba realizar un gran esfuerzo para concluir la parte II y la presentación de información sobre las necesidades específicas en materia de prestación de servicios climáticos. En su decimocuarta reunión, celebrada en 2005, la Comisión restableció el Equipo de Expertos y acordó que el Grupo de Gestión se ocuparía de algunas actividades generales. Dichas actividades comprendían la continuación de la elaboración de la parte II de la Guía y más tareas relativas al examen y la designación de los Centros Regionales sobre el Clima (CRC). Ese año, el Equipo de Expertos se reunió en Toulouse (Francia) y decidió compilar un proyecto de texto completo, incluidos los anexos, de la tercera edición de la Guía.

Gracias al esfuerzo colectivo y los conocimientos técnicos aportados por numerosos autores, editores y supervisores internos y externos, el texto de la tercera edición de la Guía finalmente recibió la aprobación de la presidencia de la Comisión de Climatología justo antes de la decimoquinta reunión de la Comisión, celebrada en Antalya (Turquía) en febrero de 2010. La

Comisión, en su decimosexta reunión, celebrada en Heidelberg (Alemania) en julio de 2014, decidió establecer un Equipo Especial sobre la *Guía de prácticas climatológicas* con el mandato de actualizar periódicamente la presente publicación a fin de garantizar que los usuarios pudiesen disponer oportunamente de los mejores conocimientos científicos. La presente versión de la Guía, aprobada por la Comisión de Climatología en su decimoséptima reunión, celebrada en Ginebra en abril de 2018, es el resultado de la labor de ese Equipo Especial.

La presente versión actualizada de la *Guía* se publica en inglés y se traducirá gradualmente a los demás idiomas oficiales de la OMM con el fin de maximizar la difusión de conocimientos. Como en el caso de las versiones anteriores, los Miembros de la OMM podrán traducirla a sus idiomas nacionales, si procede.

Deseo expresar mi agradecimiento a la Comisión de Climatología de la OMM por haber tomado la iniciativa de supervisar este largo proceso. En nombre de la Organización Meteorológica Mundial, también deseo expresar mi agradecimiento a todos aquellos que han contribuido a la elaboración de esta publicación. Es digno de un reconocimiento especial el señor Thomas C. Peterson, presidente saliente de la Comisión de Climatología (2010 a 2018), quien ofreció orientación y supervisó la preparación del texto durante los períodos decimoquinto y decimosexto entre reuniones de la Comisión. Asimismo, deseo agradecer las importantes contribuciones del señor Govindarajalu Srinivasan (India), Director del Equipo Especial sobre la *Guía de prácticas climatológicas*, y el señor Nathaniel Guttman (Estados Unidos de América), editor científico principal de la presente versión de la publicación.



(Petteri Taalas)  
Secretario General



# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 FINALIDAD Y CONTENIDO DE LA GUÍA**

La presente publicación tiene por objeto proporcionar orientación y asistencia a los Miembros de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para llevar a cabo actividades nacionales vinculadas con la información y los servicios climáticos. Existen dos ediciones anteriores de la presente Guía: la versión original, publicada en 1960, y la segunda edición, publicada en 1983. Si bien muchos fundamentos de la climatología y de las prácticas climatológicas han persistido a lo largo del tiempo, los adelantos científicos logrados en el área de la climatología y en las técnicas de análisis de datos, así como los cambios en la tecnología, la capacidad informática y los instrumentos, han hecho que la segunda edición resulte obsoleta.

En la tercera edición se describen los principios básicos y las prácticas modernas fundamentales para la elaboración y prestación de todos los servicios climáticos y se presentan mejores prácticas en materia de climatología. Esta edición presenta conceptos y consideraciones y remite a otras fuentes de orientación técnica e información, en lugar de pretender abarcar absolutamente toda la información. La versión actual se publicó en 2011. No obstante, se revisará periódicamente para mantener actualizado su contenido.

En este primer capítulo figura información sobre la climatología y su alcance, la organización y las funciones de un servicio climático nacional y los programas climáticos internacionales. El resto de la Guía se divide en otros seis capítulos ("Observaciones, estaciones y redes climáticas", "Gestión de datos climáticos", "Caracterización del clima a partir de conjuntos de datos", "Métodos estadísticos para analizar conjuntos de datos", "Los productos climáticos y su difusión" y "Prestación de servicios") y un anexo ("Actividades climáticas a nivel internacional").

En la medida de lo posible, los procedimientos descritos en la Guía se han extraído de decisiones sobre normas y prácticas y procedimientos recomendados. Las principales decisiones concernientes a las prácticas climáticas figuran en el Reglamento Técnico y los manuales de la OMM y en los informes del Congreso Meteorológico Mundial y el Consejo Ejecutivo y proceden principalmente de recomendaciones formuladas por la Comisión de Climatología. En la sección de referencias al final de cada capítulo se facilitan listas de publicaciones pertinentes de la OMM y de otras fuentes que son de especial interés para quienes se desempeñan en el ámbito de la climatología.

## **1.2 CLIMATOLOGÍA**

La climatología consiste en el estudio del clima, el funcionamiento del sistema climático, sus variaciones y extremos y su influencia en diversas actividades, entre ellas los recursos hídricos y la salud, la seguridad y el bienestar humanos. En sentido estricto, se entiende por clima las condiciones meteorológicas normales correspondientes a un lugar y período de tiempo determinados. El clima puede explicarse mediante descripciones estadísticas de las tendencias centrales y la variabilidad de elementos pertinentes como la temperatura, la precipitación, la presión atmosférica, la humedad y los vientos, o mediante combinaciones de elementos, tales como tipos y fenómenos meteorológicos, que son característicos de un lugar o región, o la Tierra en su conjunto, durante cualquier período de tiempo. Además de tratar el clima como una entidad estadística, también se puede estudiar como un factor determinante de las actividades humanas, o como un recurso o un riesgo para estas últimas.

La climatología estudia tanto la variabilidad del clima como el cambio climático. La variabilidad del clima se refiere a las variaciones de las condiciones climáticas entre períodos (por ejemplo, intraestacionales, interanuales e interdecenales). En general, la variabilidad del clima está relacionada con las variaciones que afectan al estado de la circulación atmosférica y oceánica y las propiedades de la superficie terrestre (por ejemplo, la humedad del suelo) a escala

intraestacional o interdecenal. En contraposición, el cambio climático se refiere a un cambio sistemático en las propiedades estadísticas del clima (por ejemplo, la media y la varianza) durante un período prolongado (por ejemplo, de décadas a siglos), que se manifiesta en una tendencia creciente o descendente en los valores de las lluvias extremas, por ejemplo. Durante la mayor parte de la historia climática de la Tierra, los cambios sistemáticos del clima se produjeron por causas naturales, como variaciones relacionadas con la naturaleza de la órbita de la Tierra alrededor del sol o la irradiación solar, así como por la evolución de las relaciones entre los componentes “naturales” que forman el sistema climático (véase la sección 1.2.2). No obstante, hoy día existen cada vez más evidencias de que los seres humanos y sus actividades constituyen un componente importante del sistema climático.

### 1.2.1 Historia

En los poemas de la antigua Grecia y en el Antiguo Testamento de la Biblia judeocristiana ya podían encontrarse referencias al tiempo. Aparecen referencias aún más antiguas en los Vedas, las escrituras hindúes más antiguas, que fueron escritas aproximadamente en 1800 a. C. Asimismo, pueden encontrarse escritos específicos sobre el tema de la meteorología y la climatología en la obra *Sobre los aires, aguas y lugares* de Hipócrates, que data de aproximadamente el año 400 a. C., seguida por *Acerca del cielo: Meteorológicos*, de Aristóteles, escrita hacia el año 350 a. C. Para los primeros filósofos griegos, el clima significaba "pendiente" y se refería a la curvatura de la superficie de la Tierra, la cual da lugar a la variación del clima según la latitud debido a la incidencia cambiante de los rayos del Sol. En la obra de los filósofos Aristarco y Eratóstenes, de Alejandría, se indican deducciones lógicas y fiables relativas al clima.

Con el comienzo de las amplias exploraciones geográficas en el siglo XV, empezaron a aparecer descripciones de los climas de la Tierra y de las condiciones que daban lugar a dichos climas. La invención de instrumentos meteorológicos, tales como el termómetro de Galileo Galilei en 1593 y el barómetro de Evangelista Torricelli en 1643, dio un mayor impulso al establecimiento de las relaciones matemáticas y físicas entre las diferentes características de la atmósfera. A su vez, ello llevó a establecer relaciones que permitían describir el estado del clima en diferentes horas y en distintos lugares.

En 1735, George Hadley fue el primero en interpretar el régimen de circulación observada que vincula a las zonas tropicales y subtropicales, en particular, los vientos alisios, la convección tropical y los desiertos subtropicales, que, a partir de entonces, comenzó a conocerse como la celda de Hadley. Julius von Hann, quien publicó el primero de los tres volúmenes de su *Manual de Climatología* en 1883, escribió la obra clásica sobre climatología general y regional, que comprendía datos y descripciones de testigos presenciales referentes al tiempo y el clima. En 1918, Wladimir Kóppen elaboró la primera clasificación detallada de los climas mundiales de acuerdo con la cubierta vegetal del suelo. A esta labor le siguieron estudios más detallados en el ámbito de la climatología descriptiva. Por ejemplo, el geógrafo E. E. Federov (1927) intentó describir los climas locales atendiendo a observaciones meteorológicas diarias.

En los primeros treinta años del siglo XX, la utilización conjunta, de manera diligente, de las observaciones mundiales y la teoría matemática para describir la atmósfera permitió determinar condiciones atmosféricas a gran escala. Una figura notable en este ámbito fue la de Sir Gilbert Walker, quien llevó a cabo estudios pormenorizados del monzón indico, la Oscilación del Sur, la Oscilación del Atlántico Norte y la Oscilación del Pacífico Norte.

Entre otras obras importantes sobre climatología cabe mencionar la de Tor Bergeron (sobre climatología dinámica, publicada en 1930) y la de Wladimir Kóppen y Rudolf Geiger, quienes publicaron un manual de climatología en 1936. Geiger explicó hasta cierto punto el concepto de microclimatología por primera vez en 1927, pero los progresos en este campo no se produjeron hasta la Segunda Guerra Mundial. Por motivos de planificación, durante la guerra surgió la necesidad de encontrar un método para determinar la probabilidad de riesgos basándose en datos meteorológicos relativos a meses e incluso años futuros y dicho método se puso en práctica. En 1948, C.W. Thornthwaite estableció una clasificación del clima basada en un inventario hídrico y la evapotranspiración. En los decenios posteriores, se observaron importantes progresos en el desarrollo de las teorías sobre la climatología.

En septiembre de 1929, la Conferencia de Directores de la Organización Meteorológica Internacional (OMI), celebrada en Copenhague, acordó crear una comisión técnica de climatología "para el estudio de todas las cuestiones relacionadas con esta rama de la ciencia". La creación de la OMM en 1950 (como organismo sucesor de la OMI, fundada en 1873) permitió establecer un sistema de recopilación de datos y dio lugar al análisis sistemático del clima y a conclusiones sobre la naturaleza del clima. Durante los últimos decenios del siglo XX, el desafío planteado por el cambio climático llevó a centrar la atención en la necesidad de concebir el clima como una parte importante de un sistema mundial de procesos interactivos en los que intervienen todos los ámbitos importantes de la Tierra (véase la sección 1.2.2). Se entiende por cambio climático una alteración significativa en términos estadísticos del estado habitual del clima o de su variabilidad, que persiste durante un extenso período, por lo general, durante decenios o períodos más largos. Puede ser consecuencia de procesos internos naturales, el forzamiento externo o cambios antropogénicos constantes (debidos a la actividad humana o producidos por esta) en la composición de la atmósfera o en la explotación de las tierras. También se están dedicando notables esfuerzos nacionales e internacionales a otros aspectos de la climatología. Entre estos esfuerzos figuran una mejora de las mediciones y de la vigilancia del clima, una mejor comprensión de las causas y los patrones de la variabilidad natural, métodos más fiables para predecir el clima durante estaciones y años futuros, y una mejor comprensión de los vínculos entre el clima y una serie de actividades sociales y económicas y cambios ecológicos.

Las actividades recientes relacionadas con el clima han estado marcadas y determinadas fundamentalmente por tres conferencias mundiales sobre el clima, organizadas por la OMM en colaboración con otros organismos y programas de las Naciones Unidas en 1979, 1990 y 2009. En el anexo 1, Actividades climáticas a nivel internacional, se aportan más detalles sobre estas conferencias.

### 1.2.2 El sistema climático

El sistema climático (figura 1.1) es un conjunto interactivo y complejo constituido por la atmósfera, la superficie terrestre, la nieve y el hielo, los océanos y otras masas de agua y organismos vivos. La atmósfera es la capa gaseosa que envuelve la Tierra. La atmósfera seca está compuesta casi íntegramente de nitrógeno y oxígeno, pero también contiene pequeñas cantidades de argón, helio, dióxido de carbono, ozono, metano y muchos otros gases traza. La atmósfera también contiene vapor de agua, gotitas de agua condensada en forma de nubes y aerosoles. La hidrosfera es la parte del sistema climático de la Tierra que comprende el agua líquida distribuida sobre y bajo la superficie de la Tierra en océanos, mares, ríos, lagos de agua dulce, embalses subterráneos y otras masas de agua. La criosfera abarca el conjunto de elementos del sistema de la Tierra que contienen agua en estado de congelación e incluye toda la nieve y el hielo (el hielo marino, los hielos de lagos y ríos, la cubierta de nieve, la precipitación sólida, los glaciares, los casquetes de hielo, las capas de hielo, el permafrost y suelo congelado estacionalmente). La litosfera es la capa superior de la parte sólida de la Tierra, que comprende tanto la corteza continental como los fondos marinos. La biosfera engloba todos los ecosistemas y organismos vivos presentes en la atmósfera, en tierra firme (biosfera terrestre) y en los océanos (biosfera marina), incluida la materia orgánica muerta resultante de ellos, como restos, materia orgánica del suelo o desechos oceánicos.

Bajo la influencia de la radiación solar y las propiedades radiativas de la superficie terrestre, el clima de la Tierra está determinado por las interacciones que se producen entre los componentes del sistema climático. La interacción de la atmósfera con los demás componentes desempeña un papel importante en la conformación del clima. La atmósfera absorbe energía directamente de la radiación solar incidente o indirectamente mediante procesos en los que interviene la superficie de la Tierra. Esta energía se redistribuye continuamente en dirección vertical y horizontal mediante procesos termodinámicos o movimientos a gran escala con el objetivo inalcanzable de lograr la estabilidad y el equilibrio del sistema. El vapor de agua cumple una función importante en la redistribución vertical del calor mediante la condensación y el transporte de calor latente. El océano, dada su amplia capacidad térmica, limita la tasa del cambio de temperatura en la atmósfera y suministra vapor de agua y calor a esta. La disposición de los continentes afecta a las corrientes oceánicas y las montañas reorientan los movimientos atmosféricos. El hielo polar, montañoso y marino devuelve el reflejo de la radiación solar al espacio. En las latitudes elevadas,

el hielo marino actúa como un aislante y protege al océano del escape rápido de energía a la atmósfera, que está mucho más fría. La biosfera y, en particular, las actividades humanas en ella realizadas, afectan a los componentes atmosféricos, como el dióxido de carbono, al igual que a características de la superficie de la Tierra, como la humedad del suelo y el albedo.

Las interacciones entre los componentes se producen a todas las escalas (figuras 1.2 y 1.3). Desde el punto de vista espacial, la microescala abarca características climáticas en zonas pequeñas tales como edificios individuales y plantas o terrenos. Un cambio en un microclima puede resultar muy importante cuando se modifican las características físicas de una zona. Los edificios nuevos pueden causar un tiempo más ventoso, peor ventilación, una escorrentía excesiva del agua de lluvia y un incremento de la contaminación y el calor. Las variaciones naturales en un microclima, tales como las relativas al cobijo y la exposición, la insolación y la sombra, también son importantes puesto que pueden determinar, por ejemplo, qué plantas pueden florecer en un lugar dado o la necesidad de garantizar la seguridad en el entorno laboral y las actividades de ocio. La mesoescala abarca el clima de una región de extensión limitada, tal como una cuenca de drenaje fluvial, un valle, una conurbación o un bosque. Las variaciones mesoescales son importantes en aplicaciones tales como la explotación de las tierras, el riego y la construcción de presas, el emplazamiento de las instalaciones de energía natural y la ubicación de los recursos. La macroescala comprende el clima de vastas zonas geográficas, continentes y el mundo entero. Permite determinar los recursos y las limitaciones nacionales en la producción agrícola y la gestión del agua, y, por ende, está ligada al carácter y al alcance de la salud y el bienestar humanos. Asimismo, permite definir y determinar las repercusiones de los principales rasgos de la circulación global, tales como El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), los monzones y la Oscilación del Atlántico Norte.

Una escala temporal es un intervalo de tiempo. Puede oscilar desde minutos y horas hasta decenios, siglos e incluso períodos más largos. Las características correspondientes a un elemento medioambiental durante una hora son importantes, por ejemplo, en actividades del sector agrícola tales como el control de pesticidas y el control del consumo de energía para el suministro de calefacción y refrigeración. Las características que presenta un elemento durante un día pueden determinar las actividades humanas que pueden realizarse en condiciones seguras. El clima observado durante meses o años determinará, por ejemplo, los cultivos que pueden plantarse o la disponibilidad de agua potable y alimentos. Las escalas temporales

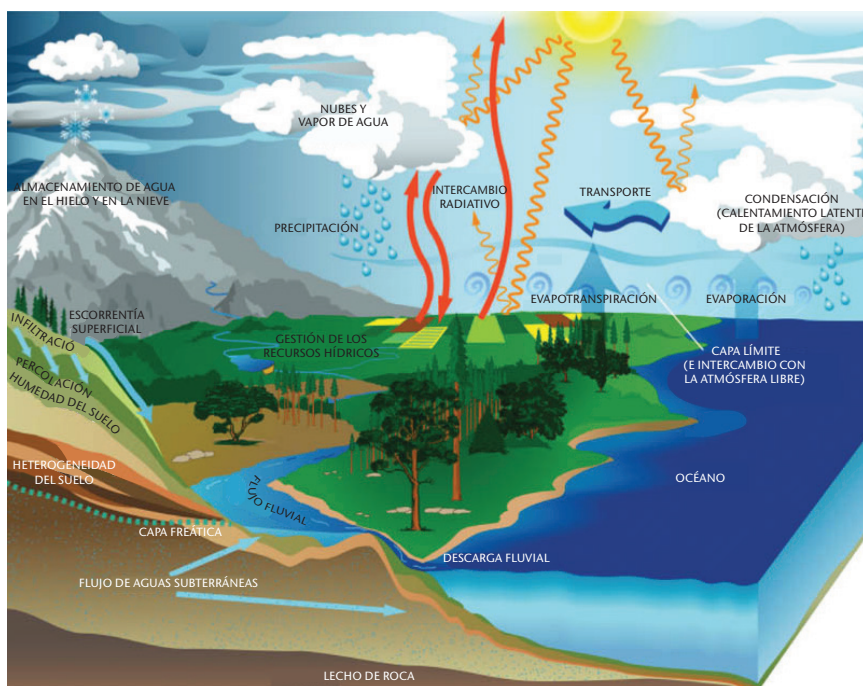
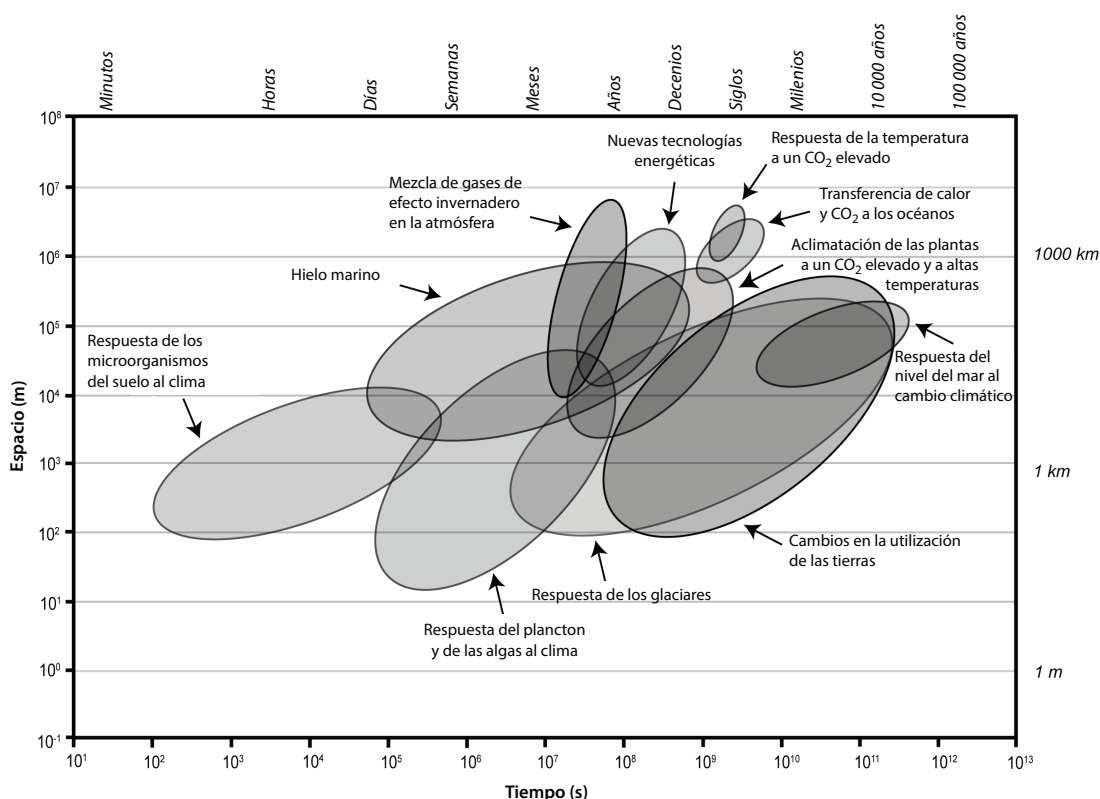


Figura 1.1. El sistema climático



**Figura 1.2. Escalas temporales y espaciales (cortesía de Todd Albert, Estados Unidos de América)**

más largas que se extienden hasta decenios y siglos son importantes para los estudios de la variación del clima provocada por fenómenos naturales tales como los cambios en la circulación atmosférica y oceánica y por las actividades del hombre.

El cambio climático se ha convertido en un problema importante para los seres humanos. Las actividades del hombre, especialmente la quema de combustibles fósiles, han dado lugar a modificaciones en la composición de la atmósfera mundial. El marcado incremento del dióxido de carbono troposférico y del metano durante la era industrial, junto con el aumento de los aerosoles y las emisiones de partículas, están afectando notablemente al clima mundial. Los clorofluorocarbonos, de uso generalizado en el pasado como propulsores de las bombas de aerosoles, los líquidos para limpieza y los refrigerantes, constituyen una de las causas principales del agotamiento del ozono estratosférico. Entre 1960 y 2000, quedó arrasada más de la quinta parte de los bosques tropicales del mundo, hecho que probablemente alteró los complejos ciclos hidrológicos mundiales y mesoescalares. Los cañones artificiales que forman los edificios en las ciudades, junto con las superficies asfaltadas de las calles, hacen que se absorba una mayor cantidad de radiación solar y dan lugar a islas de calor urbanas. La escorrentía acelerada del agua de la lluvia y la deforestación hacen que se reduzca la cantidad de vapor de agua transpirada que, de otro modo, ayudaría a moderar la temperatura. La contaminación generada por los vehículos y edificios se acumula, especialmente en condiciones de tiempo en calma, y causa muchos problemas para la salud humana, así como daños en las estructuras.

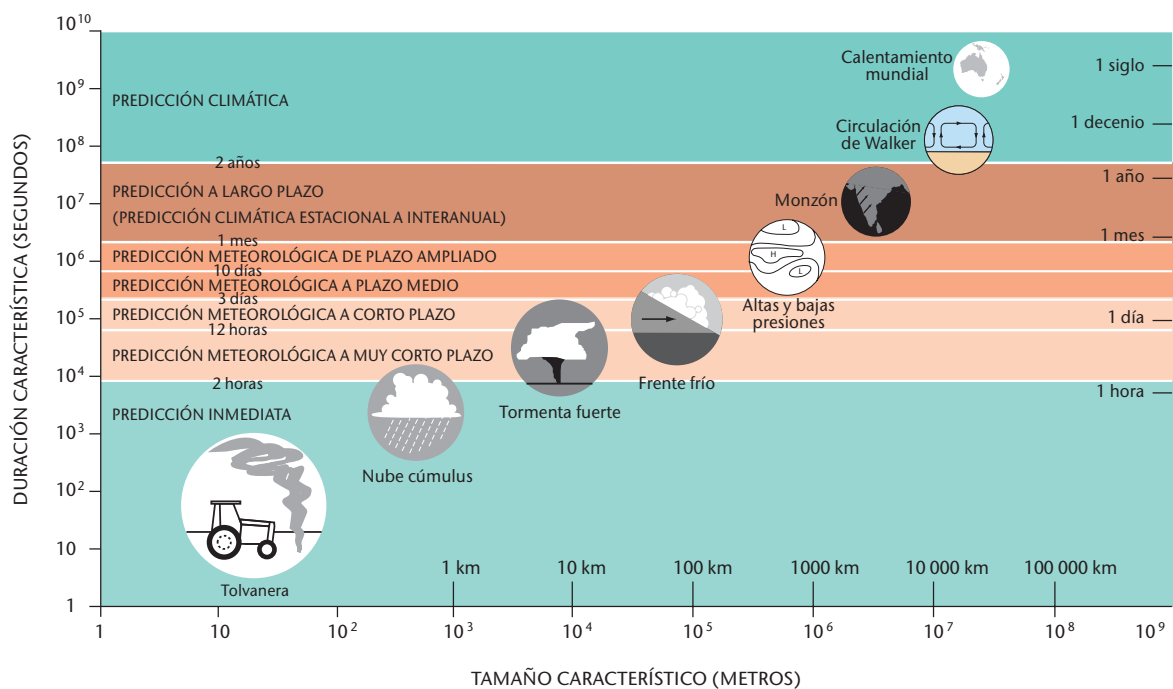
Consciente de que en todo el mundo es cada vez mayor la preocupación por el peligro de los daños irreversibles que se están produciendo en el entorno natural, la OMM ha asumido el liderazgo en el fomento de estudios sobre los cambios en el sistema climático y sus efectos en la humanidad, la energía mundial y la producción de alimentos y las reservas de agua. El cambio climático y sus posibles consecuencias, al igual que los efectos que ya se han producido, se han convertido en temas clave que han venido examinando las instancias decisorias en años recientes y, en algunos países, estas preocupaciones son solo superadas en importancia por los asuntos económicos y de defensa. Incluso en estos dos ámbitos, el clima es un factor que



interviene en la planificación estratégica y en el proceso táctico de adopción de decisiones. Se han celebrado numerosas conferencias internacionales con el propósito de determinar maneras de reducir las repercusiones de la actividad humana en el clima y concebir estrategias para explotar el clima con el fin de obtener beneficios sociales y económicos. Entre estas reuniones cabe citar las Conferencias Mundiales sobre el Clima, celebradas en Ginebra en 1979, 1990 y 2009; la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro en 1992, y la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, que tuvo lugar en Johannesburgo en 2002. El establecimiento del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y del Comité Intergubernamental de Negociación de una Convención Marco sobre el Cambio Climático también representa dos hitos importantes en el empeño por hacer frente a los cambios observados en el clima que guardan relación con las actividades humanas.

### 1.2.3 Usos de la información e investigación climatológicas

La climatología se ha convertido en una rama dinámica de la ciencia que abarca una amplia gama de funciones y aplicaciones. Se están desarrollando nuevas técnicas y realizando trabajos de investigación con objeto de estudiar la aplicación del clima en muchos sectores, en particular, la agricultura, la silvicultura, los ecosistemas, la energía, la industria, la producción y distribución de bienes de consumo, la planificación técnica y la construcción, el bienestar humano, el transporte, el turismo, los seguros, la gestión de recursos hídricos y de desastres, la pesca y el desarrollo de las zonas costeras. Se necesitan programas de investigación viables sobre el sistema climático y su amplia influencia, y sobre las aplicaciones de los conocimientos climáticos para beneficiar a la sociedad, de modo que los climatólogos puedan informar y asesorar a los usuarios y responder a un sinnúmero de preguntas sobre el clima. Anteriormente, el estudio del clima proporcionaba datos básicos, información y técnicas que permitían determinar climas locales, mesoescalares y mundiales. Si bien estas son prestaciones elementales, también constituyen el punto de partida para efectuar análisis más profundos y ofrecer servicios cuando se conjugan con otros datos sociales, económicos y físicos. La utilidad primordial de los datos sobre el clima y de las predicciones climáticas para planificar la atenuación de los desastres y el desarrollo sostenible



**Figura 1.3. Duración característica de los fenómenos atmosféricos**

Fuente: J.W. Zillman, Boletín de la OMM, vol. 48(2), 1999

y hacer frente a todas las consecuencias del cambio climático ya ha quedado firmemente establecida en varias convenciones, tales como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

La climatología aplicada aprovecha al máximo la información y los conocimientos meteorológicos y climatológicos para resolver problemas prácticos de carácter social, económico y medioambiental. Los servicios climatológicos están pensados para atender a diversos usuarios del sector público y de sectores comerciales e industriales. Las evaluaciones de los efectos de la variabilidad del clima y el cambio climático en las actividades humanas, así como de los efectos de las actividades humanas en el clima, son factores principales en el desarrollo económico, los programas sociales y la gestión de recursos a nivel local, nacional y mundial.

El actual interés por las repercusiones del desarrollo económico y otras actividades humanas en el clima y la manera en la que la variabilidad del clima y el cambio climático influyen en las sociedades humanas pone de relieve la necesidad de continuar con la investigación de los procesos físicos y dinámicos que intervienen en el sistema climático, así como la necesidad de una descripción estadística de los mismos. Para mejorar la capacidad de responder eficazmente a los problemas sociales y económicos es fundamental comprender la variabilidad natural del clima, tener en cuenta la sensibilidad del clima a las actividades humanas y tener conocimientos sobre la predictibilidad del tiempo y el clima relativa a períodos que pueden abarcar desde días hasta decenios. La climatología física abarca una amplia gama de estudios que incluyen procesos interactivos del sistema climático. La climatología dinámica está estrechamente relacionada con la climatología física, pero se ocupa primordialmente de las configuraciones de la circulación general de la atmósfera. Ambas suponen la descripción y el estudio de las propiedades y el comportamiento de la atmósfera.

Hoy en día, en todo el mundo se lleva a cabo una importante labor para mejorar la predicción climática. En un principio, las predicciones se basaban en técnicas empíricas y estadísticas, pero actualmente se derivan cada vez más de técnicas de predicción numérica del tiempo ampliadas. Se están elaborando modelos cada vez más complejos que representan y acoplan la interfaz atmósfera-océano-tierra, el hielo marino y los aerosoles y gases. Los modelos pueden utilizarse para simular el cambio climático durante varios decenios, así como para predecir variaciones estacionales o interanuales del clima. Por lo general, esas predicciones estacionales de la evolución probable del clima suponen la probabilidad de que el valor de un elemento, tal como la temperatura media o la precipitación agregada correspondiente a un período, será superior, aproximado o inferior al normal. Actualmente, las predicciones estacionales de la evolución probable del clima resultan acertadas en el caso de las regiones donde existe una estrecha relación entre la temperatura de la superficie del mar y el tiempo, como en muchas zonas regiones tropicales. Sin embargo, dado su carácter probabilístico, debe tenerse especial cuidado en su difusión y aplicación. La adopción de decisiones en las que se incorpora información climática constituye un campo de interés creciente para la investigación.

Todos los productos y servicios climáticos, desde la información derivada de datos meteorológicos y climáticos obtenidos en el pasado hasta las estimaciones sobre el clima futuro, para su uso en la investigación, las operaciones, el comercio y el gobierno se sustentan en datos recopilados mediante la observación y el registro amplio y sistemático de una serie de variables clave que permiten caracterizar el clima en una amplia gama de escalas temporales. La adecuación de un servicio climático depende en gran medida de la densidad espacial y la exactitud de las observaciones, así como del proceso de gestión de datos. Si no se realizan observaciones sistemáticas del sistema climático, no puede haber servicios climáticos.

La necesidad de disponer de información más exacta y oportuna continúa aumentando rápidamente debido a que la diversidad de las necesidades de los usuarios continúa ampliándose. En beneficio propio, cada país debe utilizar prácticas coherentes a la hora de realizar las observaciones climáticas, manejar los registros climáticos y mantener la calidad y utilidad necesarias de los servicios prestados.

### 1.3 PROGRAMAS INTERNACIONALES SOBRE EL CLIMA

La Comisión de Climatología (CCI) de la OMM se encarga de responder al conjunto de necesidades de asesoramiento, apoyo y coordinación de los Miembros de la OMM para llevar a cabo numerosas actividades climáticas. A la Comisión se la ha conocido con nombres ligeramente diferentes y se le ha modificado el mandato conforme al cambio de las necesidades y prioridades, pero ha venido desempeñándose eficazmente desde que fuera establecida en 1929 en el marco de la Organización Meteorológica Internacional. La Comisión proporciona orientación general para la aplicación del Programa Mundial sobre el Clima dentro de la OMM. En el anexo 1 se ofrece mayor información respecto de los programas internacionales sobre el clima.

### 1.4 ACTIVIDADES CLIMÁTICAS A ESCALA MUNDIAL Y REGIONAL

Todos los países deberían comprender y satisfacer las necesidades del público en materia de información climática. Para ello, se requieren observaciones climáticas, la gestión y transmisión de datos, diversos servicios de datos, la vigilancia del sistema climático, aplicaciones y servicios prácticos para diferentes grupos de usuarios, predicciones en escalas subestacionales e interanuales, proyecciones climáticas y evaluaciones de la variabilidad del clima y el cambio climático que resulten útiles para la formulación de políticas, así como prioridades en materia de investigación que incrementen los posibles beneficios de todas estas actividades. Es posible que muchos países, especialmente los países en desarrollo y los países menos adelantados, no sean autosuficientes para prestar todos estos servicios. En la Tercera Conferencia Mundial sobre el Clima, celebrada en Ginebra en 2009, se propuso establecer un Marco Mundial para los Servicios Climáticos con el fin de mejorar la elaboración, disponibilidad, prestación y aplicación de predicciones y servicios climáticos sustentados en conocimientos científicos. El Marco pretende ofrecer un mecanismo para los promotores y proveedores de información climática, así como para todos los sectores dependientes del clima de todo el mundo, con el fin mancomunar la labor para ayudar a la comunidad mundial a adaptarse mejor a los desafíos que plantean el cambio climático y la variabilidad del clima.

La Organización Meteorológica Mundial ha desarrollado una red de Centros Mundiales de Producción de Predicciones a Largo Plazo y Centros Regionales sobre el Clima (CRC) con objeto de ayudar a los Miembros a responder eficazmente a sus necesidades de información climática. Las definiciones y funciones obligatorias de los Centros Mundiales de Producción y de los CRC figuran en el *Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción* (OMM-N° 485), parte I, y son parte del Reglamento Técnico de la OMM. En la parte II del Manual también se establecen los criterios que sigue la OMM para designar los Centros Mundiales de Producción y los CRC, así como otros centros operativos.

Los Centros Mundiales de Producción designados elaboran predicciones mundiales a largo plazo de acuerdo con los criterios definidos en el *Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción* y son reconocidos por la OMM por recomendación de la Comisión de Sistemas Básicos. Además, la OMM ha establecido un Centro principal de predicción a largo plazo mediante conjuntos multimodelos y el Centro principal encargado del sistema de verificación de predicción a largo plazo, que aportan valor añadido a los servicios operativos de los Centros Mundiales de Producción.

Los Centros Regionales sobre el Clima tienen por objeto ayudar a los Miembros de la OMM de una determinada región a proporcionar productos y servicios climáticos mejores y más coherentes, tales como las predicciones regionales a largo plazo, y reforzar la capacidad de los Miembros para responder a las necesidades de información climática en el ámbito nacional. Los principales clientes de los CRC son los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) y otros CRC de la región y de zonas vecinas. Los servicios y productos de los CRC se suministran a los SMHN para que estos les den una mejor definición y difusión y no se habrán de distribuir a los usuarios sin la autorización de los SMHN de la región. Las funciones de un CRC no son una repetición ni sustitución de las de los SMHN. Es importante observar que los



SMHN conservan el mandato y la autoridad para proporcionar el enlace con los grupos de usuarios nacionales y para emitir advertencias y avisos, y que todos los CRC deben ajustarse a los principios de la Resolución 40 (Cg-XII) de la OMM relativa al intercambio de datos y productos.

Todos los productos y servicios de los CRC pueden variar de una región a otra, de acuerdo con las prioridades establecidas por la asociación regional pertinente. Sin embargo, habrá ciertas funciones fundamentales que deben cumplir todos los CRC designados por la OMM conforme a criterios establecidos, lo que permitirá garantizar cierta uniformidad de los servicios de los CRC en todo el mundo. Dichas funciones comprenden:

- a) actividades operativas para la predicción a largo plazo, en particular, la interpretación y evaluación de productos de los Centros Mundiales de Producción, la elaboración de productos adaptados a cada caso específico a escala regional y subregional y la elaboración de declaraciones consensuadas respecto de las predicciones regionales o subregionales;
- b) la vigilancia del clima, en particular diagnósticos del clima a nivel regional y subregional, análisis de la variabilidad y los extremos del clima y la puesta en marcha de operaciones de vigilancia climática a nivel regional para los fenómenos climáticos extremos;
- c) servicios de datos para respaldar la predicción a largo plazo, en particular, la elaboración de conjuntos de datos de climas regionales, y
- d) la formación sobre la utilización de productos y servicios operativos de los CRC.

Además de estas funciones obligatorias de los CRC, se recomienda muy encarecidamente llevar a cabo una serie de actividades. Entre ellas figuran la reducción de escala de los escenarios de cambio climático, los servicios de datos no operativos como el rescate de datos y la homogeneización de datos, las funciones de coordinación, la formación profesional y la creación de capacidad, y la investigación y el desarrollo.

Reconociendo que la información climática puede resultar sumamente beneficiosa para la adaptación a las repercusiones de la variabilidad del clima y el cambio climático y la atenuación de sus efectos, la OMM ha ayudado a establecer los foros regionales sobre la evolución probable del clima. La función global de los foros, que aplican fundamentalmente un enfoque consensual, consiste en elaborar y difundir una evaluación del estado del clima regional previsto para la estación siguiente. Los foros se organizan con fines operativos y congregan a climatólogos nacionales, regionales e internacionales para elaborar proyecciones climáticas regionales basadas en datos procedentes de los SMHN, instituciones regionales, CRC y Centros Mundiales de Producción. Asimismo, ofrecen una oportunidad para que los climatólogos conozcan mejor la opinión de los usuarios y catalizan el desarrollo de productos concretos pensados en el usuario. En ellos también se examinan los obstáculos para el uso de la información climática, se comparten experiencias de éxito sobre aplicaciones de productos anteriores y se mejoran las aplicaciones de sectores concretos. A menudo, los foros regionales conducen a la celebración de foros nacionales que desarrollan proyecciones detalladas sobre la evolución probable del clima e información de riesgos a escala nacional, en particular de avisos, para las instancias decisorias y el público.

Por lo general, el proceso de los foros regionales sobre la evolución probable del clima, cuya forma puede variar de una región a otra, comprende, como mínimo, la primera de las actividades siguientes y, en algunos casos, las cuatro:

- a) reuniones de expertos climáticos regionales e internacionales para llegar a un consenso sobre la evolución probable del clima regional, por lo general en forma probabilística;
- b) un foro más amplio en el que participen tanto climatólogos como representantes de los sectores de usuarios para presentar predicciones consensuadas sobre la evolución probable del clima, debatir y determinar las repercusiones e implicaciones sectoriales previstas, y formular estrategias de respuesta;

- c) talleres de formación sobre la predicción climática estacional para reforzar la capacidad de los climatólogos nacionales y regionales, y
- d) sesiones especiales de divulgación en la que participan expertos de los medios de comunicación con el fin de formular estrategias de comunicación eficaces.

### 1.5 **ACTIVIDADES CLIMÁTICAS A ESCALA NACIONAL**

En la mayoría de los países y desde hace mucho tiempo, los SMHN asumen responsabilidades clave relativas a las actividades climáticas nacionales, en particular, la realización, el control de calidad y el almacenamiento de las observaciones climáticas, el suministro de información climatológica, la investigación climática, la predicción climática, y las aplicaciones de los conocimientos climáticos. No obstante, el mundo académico y las empresas privadas han venido contribuyendo cada vez más a estas actividades.

Los SMHN de algunos países cuentan con una división encargada exclusivamente de todas las actividades climatológicas. En otros países, por motivos prácticos, los SMHN pueden asignar diferentes actividades climatológicas (tales como la observación, la gestión de datos y la investigación) a diferentes unidades del Servicio. La división de responsabilidades podría hacerse sobre la base de las aptitudes que se tengan en común, en campos tales como el análisis sinóptico y la observación climática, o la investigación sobre la predicción meteorológica y climática. Algunos países establecen oficinas de zona o sucursales para encomendarles las actividades subnacionales, mientras que, en otros casos, la puesta en común y retención de habilidades relativas a ciertas actividades se efectúan por medio de una entidad de cooperación regional que atiende a un grupo de países.

Cuando existe una división de responsabilidades dentro de un SMHN, o en los casos en los que las responsabilidades se transfieren completamente a otra institución, es fundamental que exista un vínculo estrecho entre quienes aplican los datos climatológicos en el campo de la investigación o los servicios y quienes están encargados de obtener y gestionar las observaciones. Este vínculo es fundamental para determinar la adecuación de las redes y el contenido y el control de calidad de las observaciones. También es esencial que el personal reciba una formación que se adecúe a las funciones que desempeña con objeto de que los aspectos climatológicos se manejen con la misma eficacia que podría hacerlo una división o un centro climático integrado. Si el manejo de datos se efectúa en varias entidades, es importante establecer una única autoridad de coordinación para garantizar que no haya divergencias entre los conjuntos de datos. Los climatólogos de un SMHN deberán responder directamente de los aspectos siguientes, o aconsejar y asesorar al respecto:

- a) la planificación de redes de estaciones;
- b) la ubicación o reubicación de las estaciones climatológicas;
- c) el cuidado y la seguridad de los emplazamientos de observación;
- d) la inspección periódica de las estaciones;
- e) la selección y formación de observadores, y
- f) los instrumentos o sistemas de observación que habrán de instalarse para garantizar la obtención de registros representativos y homogéneos (véase el capítulo 2).

Una vez que los datos de observación se hayan obtenido, es preciso gestionarlos. La gestión de información procedente de los emplazamientos de observación implica la obtención, el control de calidad, el almacenamiento y el archivo de los datos y metadatos, así como el acceso a ambos (véase el capítulo 3). Otra de las funciones consiste en difundir la información climática recopilada. Un SMHN debe ser capaz de prever, investigar y comprender las necesidades en materia de información climatológica de los departamentos gubernamentales, las instituciones

de investigación y académicas, el comercio, la industria y el público en general; promover y comercializar el uso de la información; poner a disposición sus conocimientos técnicos para interpretar los datos, y brindar asesoramiento acerca de la utilización de los datos (véanse los capítulos 6 y 7).

Un SMHN debería mantener un programa de investigación y desarrollo permanente o colaborar con una institución que tenga capacidades de investigación y desarrollo directamente relacionadas con las funciones y operaciones climatológicas del SMHN. El programa de investigación debería explorar nuevas aplicaciones y productos climáticos que permitan a los usuarios comprender y aplicar mejor la información climática.

Los estudios deberían explorar métodos nuevos y más eficientes de gestionar un volumen de datos que crece incesantemente, mejorar el acceso de los usuarios a los datos archivados y transferir datos a formatos digitales. Los programas de aseguramiento de la calidad relativos a las observaciones y los resúmenes deberán evaluarse sistemáticamente con el fin de desarrollar técnicas mejores y más oportunas. También deberá fomentarse la utilización de plataformas de difusión de información tales como Internet.

El cumplimiento de las obligaciones nacionales e internacionales y la creación de capacidad de un SMHN relacionada con las actividades climáticas solo pueden lograrse si se dispone de personal con la formación suficiente. Por lo tanto, un SMHN debería mantener y fomentar vínculos con instituciones de formación e investigación que se ocupen de la climatología y sus aplicaciones. En particular, debería velar por que el personal asista a cursos de formación que complementen la formación meteorológica general con una enseñanza y unos conocimientos prácticos específicamente centrados en la climatología. El Programa de Enseñanza y Formación Profesional de la OMM fomenta y apoya una colaboración internacional que comprende la creación de una serie de mecanismos para la formación continua, tales como becas, conferencias, visitas de familiarización, formación asistida por computadora, cursos de formación y transferencia de tecnología a países en desarrollo. Además, otros programas de la OMM, tales como el Programa Mundial sobre el Clima, el Programa de Hidrología y Recursos Hídricos y el Programa de Meteorología Agrícola, llevan a cabo actividades de creación de capacidad relacionadas con los datos, la vigilancia, la predicción, las aplicaciones y los servicios climáticos. Para lograr buenos resultados, un programa nacional de servicios climáticos debe poseer una estructura que funcione eficazmente dentro de un país concreto. La estructura debe ser de naturaleza tal que permita la integración de las aplicaciones disponibles, la investigación científica, las capacidades tecnológicas y las comunicaciones en un sistema unificado. Los componentes esenciales de un programa nacional de servicios climáticos son los siguientes:

- a) mecanismos para garantizar que se reconozcan las necesidades de información y predicción climáticas de todos los usuarios;
- b) la recopilación de observaciones meteorológicas y afines, la gestión de bases de datos y el suministro de datos;
- c) la coordinación de la investigación meteorológica, oceanográfica, hidrológica y científica conexa con objeto de mejorar los servicios climáticos;
- d) estudios multidisciplinarios para determinar el riesgo a nivel nacional y la vulnerabilidad a nivel de sectores y comunidades en relación con la variabilidad del clima y el cambio climático, con el fin de formular estrategias de respuesta adecuadas y recomendar políticas nacionales;
- e) la elaboración y el suministro de información climática y servicios de predicción para responder a las necesidades de los usuarios, y
- f) vínculos con otros programas que persiguen objetivos semejantes o afines para evitar una duplicidad de esfuerzos innecesaria.

Es importante comprender que un programa nacional de servicios climáticos constituye un proceso permanente cuya estructura puede cambiar con el tiempo. Una parte integral de este

proceso es examinar y tener en cuenta constantemente las necesidades y la opinión de los usuarios con objeto de desarrollar productos y servicios útiles. La recopilación de información sobre las necesidades y los requisitos es fundamental para el proceso de desarrollo del programa. Los usuarios pueden contribuir a ello mediante la evaluación de los productos, lo cual invariablemente lleva al perfeccionamiento de los mismos y a la elaboración de productos mejorados. Calcular los beneficios de la aplicación de productos puede resultar una tarea difícil, pero la interacción con los usuarios mediante talleres, actividades de formación y otras actividades de divulgación ayudará al proceso. Será mucho más fácil justificar la necesidad de establecer un programa nacional de servicios climáticos o las solicitudes de apoyo financiero internacional para ciertos aspectos del programa si se fundamentan cabalmente las necesidades de los usuarios y se formulan comentarios positivos. La corroboración del apoyo al programa, por parte de uno o más representantes de la comunidad de usuarios, es esencial para orientar las actividades futuras y para ayudar a promover el servicio como una entidad con éxito.

## 1.6 GESTIÓN DE LA CALIDAD

Uno de los medios de asegurar la eficacia de un programa nacional de servicios climáticos es aplicar un sistema de gestión de la calidad. Muchos SMHN se esfuerzan por obtener observaciones de alto nivel y, en última instancia, por suministrar productos y servicios de calidad. Por lo tanto, el concepto de calidad no es desconocido, pero el modo en que este se plasma en un sistema sí puede ser novedoso. Por definición, un sistema de gestión de la calidad es el conjunto de políticas, procesos y procedimientos necesarios para planear y ejecutar diversos procesos institucionales fundamentales que mejoren el rendimiento de los SMHN. Un sistema de gestión de la calidad permite a las organizaciones determinar, medir, controlar y mejorar los diversos procesos institucionales básicos que, en última instancia, mejorarán el desempeño de la organización y aumentarán la satisfacción del cliente.

Los componentes del sistema de gestión de la calidad estarán determinados por el SMHN con arreglo a sus objetivos y metas. Un sistema de gestión de la calidad basado en normas internacionales como las establecidas por la ISO resulta útil porque establece requisitos que pueden orientar toda la gestión de la calidad del SMHN. También prevé una auditoria externa de los procesos y, por lo tanto, una validación del sistema a cargo de un organismo independiente. La adopción de la norma de calidad ISO 9001:2015 garantizará una calidad preestablecida; esto es preferible a dejar la mejora de la calidad en manos del azar.

Al desarrollar un sistema de gestión de la calidad basado en la norma ISO 9001:2015, se tendrán en cuenta los siguientes principios de gestión de la calidad:

- la orientación al cliente;
- el liderazgo;
- la participación de las personas;
- un enfoque basado en procesos;
- la mejora;
- la adopción de decisiones basadas en datos empíricos;
- la gestión de las relaciones.

El enfoque de la norma ISO 9001:2015 de gestión de la calidad se basa en la gestión de los procesos y de su interacción mediante el llamado ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA). Esto implica establecer objetivos y procesos teniendo en cuenta los recursos disponibles para satisfacer las necesidades de los clientes. Así, se ejecutan los procesos planeados y a continuación se comprueba que los resultados obtenidos, es decir, los productos y servicios suministrados, se

ajustan a lo previsto. En caso de que se identifiquen mejoras, estas se examinarán debidamente y se repetirá de nuevo todo el ciclo. Es necesario abordar durante el ciclo los riesgos y las oportunidades de mejora de la eficiencia del sistema que puedan detectarse.

Las ventajas de un sistema de gestión de la calidad son:

- la coherencia en la producción de productos y servicios de calidad;
- el apoyo para dar respuesta a las necesidades de los clientes;
- formas más eficientes de trabajar que ahorrarán tiempo, dinero y recursos;
- la mejora de los resultados operativos mediante la reducción de errores;
- la motivación y el compromiso del personal con procesos internos más eficientes;
- la facilitación e identificación de oportunidades de formación;
- la ayuda para identificar riesgos y oportunidades.

Un sistema de gestión de la calidad ayuda a una organización a coordinar y dirigir sus actividades para cumplir los requisitos normativos y satisfacer las necesidades de los clientes, y contribuye a mejorar su eficacia y eficiencia de manera constante. Por lo tanto, lo ideal sería un sistema de gestión de la calidad integral que abarcara todas las actividades, desde las mediciones y observaciones sin procesar hasta los servicios prestados a los usuarios. Un sistema de esa índole trataría de aumentar la calidad y el rendimiento para cumplir o incluso superar las expectativas de los clientes sin dejar de tener en cuenta el contexto del SMHN, así como las expectativas y las necesidades de las partes interesadas. Por tanto, un sistema de gestión de la calidad es parte importante de las prácticas climatológicas de los SMHN y tiene un papel fundamental a la hora de fomentar la calidad a lo largo de la cadena de valor, desde la instalación de los instrumentos, pasando por el almacenamiento y el control de la calidad de los datos, hasta el desarrollo de productos y servicios climatológicos. Esta cadena de valor se refuerza con la colaboración de las personas que participan en ella; aunque ninguna persona participa en todos los aspectos de la cadena, sus competencias son necesarias para lograr los objetivos establecidos (*Reglamento Técnico* (OMM-Nº 49), Volumen I).

Por lo tanto, el suministro de servicios climáticos por los SMHN puede mejorar mediante la aplicación de un sistema de gestión de la calidad, y se recomienda que se utilice la norma ISO 9001:2015 para lograrlo. Los SMHN podrán determinar y cumplir los requisitos de sus clientes valiéndose del conjunto completo de reglas del Reglamento Técnico y documentos orientativos de la OMM, que conforman una sólida base para el funcionamiento de un SMHN, cumpliendo los requisitos normativos nacionales e internacionales, y aplicando los principios de gestión de la calidad. Asimismo, los SMHN podrán supervisar y medir su propio rendimiento e identificar y mitigar los riesgos y detectar oportunidades para mejorar de manera constante su prestación de servicios. Al hacerlo, estarán en condiciones de solicitar un certificado como organización acreditada por la ISO.

En la *Guía para la aplicación de un sistema de gestión de la calidad para Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales y otros proveedores de servicios pertinentes* (OMM-Nº 1100) se aporta una descripción detallada de un sistema de gestión de calidad y su aplicación en el marco de un servicio meteorológico. Esta publicación resultará muy útil para los SMHN que estén instaurando un sistema de gestión de la calidad. El documento *Guidelines on Quality Management in Climate Services* (WMO-No. 1221) (*Directrices sobre gestión de la calidad en los servicios climáticos*), elaborado por la Comisión de Climatología de la OMM, aporta más información sobre la aplicación de la gestión de la calidad en el contexto de los servicios climáticos. Los siguientes sitios web también pueden ser de ayuda: <http://qmc.mgm.gov.tr> y [http://www.bom.gov.au/wmo/quality\\_management/qm\\_publications.shtml](http://www.bom.gov.au/wmo/quality_management/qm_publications.shtml).

## REFERENCIAS

- Aristóteles, circa 350 a. C.: *Acerca del cielo: Meteorológicos*.
- Bergeron, T., 1930: "Richtlinien einer dynamischen Klimatologie", en *Meteorologische Zeitung*, 47:246-262.
- Federov, E. E., 1927: "Climate as totality of the weather", en *Monthly Weather Review*, 55:401-403.
- Geiger, R., 1927: *Das Klima der bodennahen Luftschicht. Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie*. Cuarta edición, 1961. Braunschweig, Vieweg.
- Hadley, G., 1735: "Concerning the cause of the general trade-winds" en *Philosophical Transactions*, 39, 58-62.
- Hipócrates, circa 400 a. C.: *Sobre los aires, aguas y lugares*. Puede consultarse en: <http://classics.mit.edu/Hippocrates/airwatpl.html>.
- Organización Internacional de Normalización, 2015: *ISO 9001:2015 Sistemas de gestión de la calidad — Requisitos*.
- Köppen, W., 1918: "Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf", en *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 64:193-203, 243-248.
- Köppen, W. y R. Geiger, 1936: "Das geographische System der Klimate", en *Handbuch der Klimatologie*, volumen I, parte C. Berlín, Borntraeger.
- Thorntwaite, C.W., 1948. "An Approach toward a rational classification of climate", en *Geographical Review*, 38(1):55-94.
- Von Hann, J., 1908: *Handbuch der Klimatologie*, tres volúmenes. Stuttgart, Englehorn.
- Walker, G. T., 1923-24: "World weather, I and II", en *Memoirs of the Indian Meteorological Department*, 24(4):9.
- Organización Meteorológica Mundial, 2015: *Reglamento Técnico (OMM-Nº 49)*, Volumen I: Normas meteorológicas de carácter general y normas recomendadas, actualización de 2017. Ginebra.
- , 2017: *Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción (OMM-Nº 485)*. Ginebra.
- , 2017: *Guía para la aplicación de un sistema de gestión de la calidad para Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales y otros proveedores de servicios pertinentes (OMM-Nº 1100)*. Ginebra.

## LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- Burroughs, W., 2003: *Climate: Into the 21st Century*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Geiger, R., R.H. Aron y P. Todhunter, 2003: *The Climate Near the Ground*, sexta edición, Lanham, Maryland, Rowman and Littlefield Publishers.
- Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC), 2004: *Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC* (WMO/TD No. 1219, GCOS-92). Ginebra.
- , 2010: *Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC* (WMO/TD No. 1523, GCOS-138). Ginebra.
- Grupo de observación de la Tierra (GEO), 2005: *Global Earth Observation System of Systems (GEOSS): 10-year Implementation Plan Reference Document*. GEO 1000R/ESA SP-1284, Noordwijk, División de publicaciones de la Agencia Espacial Europea, ESTEC.
- , 2008: *GEO 2007-2009 Work Plan - Toward Convergence*. Ginebra.
- Estrategia mundial integrada de observación (IGOS), 2007: *Cryosphere Theme Report: For the Monitoring of our Environment from Space and from Earth* (WMO/TD No. 1405). Ginebra.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2004: *16 Years of Scientific Assessment in Support of the Climate Convention*. Ginebra.
- , 2007: *Climate Change 2007, The Fourth Assessment Report*, vols. 1 a 3, Cambridge (Reino Unido), Cambridge University Press.
- Landsberg, H., 1962: *Physical Climatology*, Dubois, Pennsylvania, Gray Printing.
- Mann, M.E., R.S. Bradley y M.K. Hughes, 1999: "Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations", en *Geophysical Research Letters*, 26(6):759.
- McGregor, G.R., 2006: "Climatology: Its scientific nature and scope", en *International Journal of Climatology*, 26 (1):1-5.
- McGregor, G.R., 2015: "Climatology in support of climate risk management: A progress report", en *Progress in Physical Geography*, 39:536-553.



- Organización Meteorológica Mundial, 1986: *Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts* (Villach, Austria, 9 a 15 de octubre de 1985) (WMO-No. 661). Ginebra.
- , 1990: *Forty Years of Progress and Achievement: A Historical Review of WMO* (Sir Arthur Davies, ed.) (WMO-No. 721). Ginebra.
- , 1990: *Los logros de la OMM: cuarenta años al servicio de la meteorología y la hidrología internacionales* (OMM-Nº 729). Ginebra.
- , 1992: *Vocabulario Meteorológico Internacional* (OMM-Nº 182). Ginebra.
- , 1997: *Report of the GCOS/GOOS/GTOS Joint Data and Information Management Panel, Third session* (Tokio, Japón, 15 a 18 de julio de 1997) (WMO/TD-No. 847, GCOS- 39, GOOS- 11, GTOS- 11). Ginebra.
- , 2000: *OMM - 50 años de servicio* (OMM-Nº 912). Ginebra.
- , 2003: *Proceedings of the Meeting on Organization and Implementation of Regional Climate Centres* (Ginebra, 27 y 28 de noviembre de 2003) (WMO/TD-No. 1198, WCASP-No. 62). Ginebra.
- , 2005: *The World Climate Research Programme Strategic Framework 2005–2015 – Coordinated Observation and Prediction of the Earth System (COPES)* (WMO/TD-No. 1291, WCRP- 123). Ginebra.
- , 2008: *Report of the CCI/CBS Intercommission Technical Meeting on Designation of Regional Climate Centres* (Ginebra, 21 y 22 de enero de 2008) (WMO/TD No. 1479, WCASP-No. 77). Ginebra.
- , 2009: *Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2008* (WMO-Nº 1039). Ginebra.
- , 2011: *Guía del Sistema de Gestión de la Calidad para el suministro de servicios meteorológicos para la navegación aérea internacional* (OMM-Nº 1001), actualización de 2014; guía conjunta de la OMM y la OACI.
- , 2016: *Consejo Ejecutivo - Informe final abreviado de la 68ª reunión* (OMM-Nº 1168), Resolución 5 (EC-68) - Competencias para la prestación de servicios climáticos. Ginebra.
-

## CAPÍTULO 2. OBSERVACIONES, ESTACIONES Y REDES CLIMÁTICAS

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Todas las actividades climáticas realizadas a nivel nacional, en particular, la investigación y las aplicaciones, se fundamentan principalmente en observaciones del estado de la atmósfera o el tiempo. El Sistema Mundial de Observación (SMO) proporciona observaciones del estado de la atmósfera y la superficie de los océanos. Están a cargo de su funcionamiento los SMHN, los organismos nacionales o internacionales especializados en satélites y varias organizaciones y consorcios que se ocupan de determinados sistemas de observación o regiones geográficas. El SMO es un conjunto coordinado de diferentes subsistemas de observación que proporciona de manera eficaz y rentable observaciones meteorológicas, medioambientales y geofísicas, normalizadas y de gran calidad, desde todas partes del mundo y desde el espacio exterior. Son ejemplos de los subsistemas relativos al clima la Red de Observación en Superficie (ROSS) del Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC), la Red de Observación en Altitud del SMOC (ROAS), la Red de Referencia de Observación en Altitud del SMOC, las Redes Climatológicas Básicas Regionales (RCBR), la Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG), los sistemas de observación marina y el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) por satélite. Las observaciones de estas redes y estaciones son necesarias para la preparación oportuna de análisis meteorológicos y climáticos, predicciones, avisos, servicios climáticos y trabajos de investigación para todos los programas de la OMM y los programas medioambientales pertinentes de otras organizaciones internacionales.

En el presente capítulo sobre observaciones se especifican los elementos necesarios para describir el clima y las estaciones en las que se miden dichos elementos, así como los instrumentos necesarios, el emplazamiento de las estaciones y el diseño y funcionamiento de las redes. La orientación facilitada procede de la *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-Nº 8), la *Guía del Sistema Mundial de Observación* (OMM- Nº 488), la publicación *Guidelines on Climate Observation Networks and Systems* (WMO/TD-No. 1185), y el *Manual del Sistema mundial integrado de sistemas de observación de la OMM* (OMM-Nº 1160). Cada edición de la *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* pone el énfasis en temas ligeramente diferentes. Por ejemplo, en la sexta edición (OMM, 1996), figura información útil sobre la calibración de los sensores, especialmente de la instrumentación básica empleada en las estaciones climáticas, pero en las tablas 2 y 3 de la quinta edición (OMM, 1983) se ofrece más información sobre la exactitud de las mediciones que se requieren para fines climatológicos en general. En las secciones siguientes se indican las referencias cruzadas a las publicaciones de la OMM que ofrecen orientación más detallada.

La orientación de la Guía también se fundamenta en diez principios de vigilancia del clima que figuran en el documento *Report of the GCOS/GOOS/GTOS Joint Data and Information Management Panel* (WMO/TD-No. 847):

1. Las repercusiones de los nuevos sistemas o de los cambios que se introduzcan en los sistemas existentes deberán evaluarse antes de ponerlos en práctica.
2. Los nuevos sistemas deberán coexistir con los anteriores durante un período apropiado.
3. Los detalles y la historia de las condiciones locales, los instrumentos, procedimientos operativos y algoritmos de proceso de datos y otros factores referentes a la interpretación de datos (metadatos) deberán documentarse y tratarse con la misma atención que los propios datos.
4. La calidad y la homogeneidad de los datos deberán evaluarse periódicamente como parte de las actividades habituales.



5. El estudio de las necesidades de productos y evaluaciones de la vigilancia del clima y el medio ambiente deberá incluirse entre las prioridades de observación nacionales, regionales y mundiales.
6. Las estaciones y sistemas de observación que han venido funcionando sin interrupción deberán mantenerse en funcionamiento.
7. Las observaciones complementarias deberán recibir alta prioridad cuando se trate de zonas con escasez de datos, parámetros insuficientemente observados, regiones sensibles al cambio y mediciones esenciales de baja resolución temporal.
8. Deberán especificarse los requisitos a largo plazo a los diseñadores de redes, a los operadores y a los ingenieros especialistas en instrumentos desde la fase inicial del diseño y ejecución de nuevos sistemas.
9. Deberá fomentarse la cuidadosa adaptación planificada de los sistemas de observación empleados en tareas de investigación a operaciones a largo plazo.
10. Los sistemas de gestión de datos que facilitan la consulta, el uso y la interpretación de datos y productos deberán constituir elementos esenciales de los sistemas de vigilancia del clima.

Estos principios se refieren primordialmente a las observaciones de superficie, pero son también aplicables a los datos de todas las plataformas. En la sección 2.3.4 se enumeran otros principios que atañen concretamente a las observaciones por satélite.

## 2.2 ELEMENTOS CLIMÁTICOS

Un elemento climático consiste en cualquiera de las propiedades del sistema climático que se indican en la sección 1.2.2. Cuando se combinan con otros elementos, estas propiedades permiten describir el tiempo o clima en un lugar dado durante un determinado período de tiempo. Cada elemento meteorológico observado puede también considerarse un elemento climático. Los elementos más comúnmente utilizados en la climatología son la temperatura del aire (en particular, la máxima y la mínima), la precipitación (lluvia, nieve caída y todo tipo de deposición húmeda, como granizo, rocío, cencellada blanca, escarcha y precipitación de niebla), la humedad, el movimiento atmosférico (velocidad y dirección del viento), la presión atmosférica, la evaporación, la insolación y el tiempo reinante (por ejemplo, niebla, granizo y truenos). Las propiedades de la superficie y subsuperficie terrestre (en particular los elementos hidrológicos, la topografía, la geología y la vegetación), de los océanos y de la criosfera también se utilizan para describir el clima y su variabilidad.

En las subsecciones que figuran a continuación se describen elementos comúnmente observados en determinados tipos y redes de estaciones. La información detallada figura en el *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM-N° 544), el *Reglamento Técnico* (OMM-N° 49), en particular el Volumen III, y la publicación *Guide to Agricultural Meteorological Practices* (WMO-No. 134). Estos documentos deberán estar siempre fácilmente disponibles y consultarse cuando sea necesario.

### 2.2.1 Elementos de la superficie y la subsuperficie

Una estación climatológica ordinaria satisface los requisitos básicos de zona terrestre para observar la temperatura máxima y mínima y la cantidad de precipitación diarias. Una estación climatológica principal proporciona normalmente una gama más amplia de observaciones del tiempo, el viento, las características de las nubes, la humedad, la temperatura, la presión atmosférica, la precipitación, la cubierta de nieve, la insolación y la radiación solar. Con el fin de definir la climatología de la precipitación, el viento o cualquier otro elemento concreto, a veces es necesario poner en funcionamiento una estación para observar uno o un subconjunto de estos elementos, especialmente cuando la topografía es variada. Las estaciones climatológicas

de referencia (véase la sección 2.5) suministran datos homogéneos a largo plazo con objeto de determinar las tendencias climáticas. Sería conveniente disponer de una red de estas estaciones en cada país, que representaran zonas climáticas clave y zonas vulnerables.

En las zonas urbanas, el tiempo puede tener repercusiones considerables. Las lluvias fuertes pueden causar graves inundaciones; la nieve y la lluvia engelante pueden perturbar los sistemas de transporte, y las tormentas de gran intensidad acompañadas de relámpagos, granizo y vientos fuertes pueden causar cortes de electricidad. Los vientos fuertes también pueden ralentizar o detener la circulación de automóviles, los vehículos para fines recreativos, los ferrocarriles, los vehículos de transporte y los camiones. Las zonas urbanas son particularmente susceptibles a las tormentas tropicales que llegan a tierra debido a las grandes concentraciones de personas expuestas a una situación de riesgo, la alta densidad de estructuras construidas por el hombre y la intensificación del riesgo de inundaciones y de contaminación de los suministros de agua potable. Habitualmente, las estaciones urbanas hacen observaciones de los mismos elementos que las estaciones climatológicas principales, pero, además, se ocupan de datos sobre la contaminación atmosférica como el ozono a escasa altitud y otras sustancias químicas y partículas.

En general, las observaciones marinas son físico-dinámicas y bioquímicas. Los elementos físico-dinámicos (tales como el viento, la temperatura, la salinidad, el viento y las olas de mar de fondo, el hielo marino, las corrientes oceánicas y el nivel del mar) desempeñan un papel activo en los cambios que experimenta el sistema marino. Los elementos bioquímicos (tales como el oxígeno disuelto, los nutrientes y la biomasa del fitoplancton) no suelen participar activamente en los procesos físico-dinámicos, salvo en el caso de las escalas temporales largas, y, por lo tanto, se conocen como elementos pasivos. En general, desde la perspectiva de la mayoría de los SMHN, se debería dar gran prioridad a los elementos físico-dinámicos, aunque, en algunos casos, los elementos bioquímicos podrían ser importantes para responder a las necesidades de las partes interesadas (por ejemplo, las observaciones sobre la función del dióxido de carbono en el cambio climático).

En algunos SMHN encargados del seguimiento de fenómenos hidrológicos, la planificación hidrológica o las predicciones y los avisos hidrológicos, es necesario observar y medir elementos relacionados específicamente con la hidrología. Estos elementos pueden consistir en combinaciones del nivel de ríos, lagos y embalses; el flujo fluvial; el transporte y la deposición de sedimentos; las tasas de captación y recarga; las temperaturas de agua y nieve; la capa de hielo; las propiedades químicas del agua; la evaporación; la humedad del suelo; el nivel del agua subterránea, y el alcance de las crecidas. Los elementos mencionados determinan una parte integral del ciclo hidrológico y desempeñan un papel importante en la variabilidad del clima.

Además de los elementos de superficie, los elementos de subsuperficie tales como la temperatura y humedad del suelo son especialmente importantes para las aplicaciones en las esferas de la agricultura, la silvicultura y la planificación y la gestión del uso de las tierras. Otros elementos que deberán medirse a fin de describir el entorno físico para las aplicaciones agrícolas son la evaporación procedente del suelo y las superficies de agua, la insolación, la radiación de onda corta y larga, la transpiración de las plantas, la escorrentía y el nivel freático y las observaciones meteorológicas (especialmente el granizo, los relámpagos, el rocío y la niebla). Idealmente, las mediciones de elementos importantes para la agricultura deberían efectuarse a varios niveles situados entre 200 centímetros por debajo de la superficie y 10 metros por encima de esta. Al determinar los niveles, también deberían tenerse en cuenta el tipo de cultivos y de vegetación.

Los datos indirectos consisten en mediciones de las condiciones que están relacionadas indirectamente con el clima, tales como la fenología, muestras de núcleos de hielo, varvas (depósitos de sedimento anuales), arrecifes de coral y anillos de crecimiento de los árboles. La fenología es el estudio de la periodicidad de fenómenos biológicos recurrentes en los animales y las plantas, las causas de su periodicidad con respecto a las fuerzas bióticas y abióticas y la interrelación entre fases de la misma o de diferentes especies. El retoño de las hojas, el florecimiento de las plantas en la primavera, la maduración de los frutos, el cambio de color y la caída de las hojas en otoño, así como la aparición y la partida de aves, animales e insectos

migratorios son todos ejemplos de fenómenos fenológicos. La fenología es un sistema fácil y rentable para la detección temprana de cambios en la biosfera y, por lo tanto, complementa muy bien las mediciones instrumentales de los servicios meteorológicos nacionales.

Una muestra de núcleo de hielo contiene nieve y hielo y burbujas de aire atrapadas. La composición de un núcleo, especialmente la presencia de isótopos de hidrógeno y oxígeno, se relaciona con el clima del momento en el que el hielo y la nieve quedaron depositados. Los núcleos contienen también polvo soplado por el viento, ceniza, burbujas de gas atmosférico y sustancias radiactivas de la nieve depositada cada año. Diversas propiedades presentes en los núcleos que se pueden medir proporcionan datos indirectos relativos a la temperatura, el volumen de los océanos, la precipitación, la composición química y gaseosa de la atmósfera inferior, las erupciones volcánicas, la variabilidad solar, la productividad de la superficie del mar, la extensión de los desiertos y los incendios forestales. El espesor y contenido de las varvas también están relacionados con la precipitación anual o estacional, el flujo fluvial y la temperatura.

Los arrecifes de coral tropicales son muy susceptibles al cambio climático. Los anillos de crecimiento están relacionados con la temperatura del agua y con la estación en la que crecieron los anillos. Los análisis de los anillos de crecimiento pueden hacer corresponder la temperatura del agua con un año o una estación exactos. Los datos relativos a los corales se emplean para estimar la variabilidad de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) en el pasado, la surgencia de las aguas ecuatoriales, los cambios en los movimientos rotatorios subtropicales, los regímenes de los vientos alisios y la salinidad de los océanos.

Los anillos de crecimiento de los árboles revelan una gran variabilidad interanual, así como grandes diferencias espaciales. Parte de la variación puede estar relacionada con las condiciones meteorológicas y climáticas a microescala y macroescala; las plantas pueden considerarse como dispositivos de medición integradores del medio ambiente. Dado que los árboles pueden vivir durante siglos, los anillos de crecimiento anuales de algunas especies arbóreas pueden indicar la variabilidad experimentada por el clima durante un largo período histórico (previo a las mediciones instrumentales). En muchos países, debido a la estrecha relación que existe entre el desarrollo de las plantas y el tiempo y el clima, las redes de observación fenológica están dirigidas por los SMHN.

En la tabla que figura a continuación se presentan los elementos climáticos de superficie y subsuperficie más comunes que se observan en diversas redes o tipos de estaciones.

**Ejemplos de elementos de superficie y subsuperficie  
en diferentes redes o tipos de estaciones.**

| <i>Elemento</i>       | <i>Estación climática ordinaria</i> | <i>Estación climática principal</i> | <i>Estación marina</i> | <i>Estación hidrometeorológica</i> | <i>Estación agrometeorológica</i> | <i>Estación urbana</i> | <i>Datos indirectos</i> |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Temperatura del aire  | •                                   | •                                   | •                      |                                    | •                                 | •                      |                         |
| Temperatura del suelo |                                     |                                     |                        |                                    | •                                 |                        |                         |
| Temperatura del agua  |                                     |                                     | •                      | •                                  |                                   |                        |                         |
| Precipitación         | •                                   | •                                   | •                      | •                                  | •                                 | •                      |                         |
| Tiempo                |                                     | •                                   | •                      |                                    | •                                 | •                      |                         |
| Nubes                 |                                     | •                                   | •                      |                                    | •                                 | •                      |                         |
| Presión               |                                     | •                                   | •                      |                                    | •                                 | •                      |                         |
| Visibilidad           |                                     | •                                   | •                      |                                    | •                                 | •                      |                         |
| Humedad               |                                     | •                                   | •                      |                                    | •                                 | •                      |                         |
| Viento                |                                     | •                                   | •                      |                                    | •                                 | •                      |                         |
| Radiación solar       |                                     | •                                   |                        |                                    | •                                 | •                      |                         |

| <i>Elemento</i>                      | <i>Estación climática ordinaria</i> | <i>Estación climática principal</i> | <i>Estación marina</i> | <i>Estación hidrometeorológica</i> | <i>Estación agrometeorológica</i> | <i>Estación urbana</i> | <i>Datos indirectos</i> |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Insolación                           |                                     | •                                   |                        |                                    | •                                 | •                      |                         |
| Salinidad                            |                                     |                                     | •                      |                                    |                                   |                        |                         |
| Corrientes                           |                                     |                                     | •                      |                                    |                                   |                        |                         |
| Nivel del mar                        |                                     |                                     | •                      |                                    |                                   |                        |                         |
| Olas                                 |                                     |                                     | •                      |                                    |                                   |                        |                         |
| Impulso atmósfera-océano             |                                     |                                     | •                      |                                    |                                   |                        |                         |
| Flujos atmósfera-océano              |                                     |                                     | •                      |                                    |                                   |                        |                         |
| Hielo                                |                                     |                                     | •                      | •                                  |                                   |                        |                         |
| Oxígeno disuelto                     |                                     |                                     | •                      |                                    |                                   |                        |                         |
| Nutrientes                           |                                     |                                     | •                      |                                    |                                   |                        |                         |
| Batimetría                           |                                     |                                     | •                      |                                    |                                   |                        |                         |
| Biomasa                              |                                     |                                     | •                      |                                    |                                   |                        |                         |
| Flujo fluvial                        |                                     |                                     |                        | •                                  |                                   |                        |                         |
| Alturas fluviales                    |                                     |                                     |                        | •                                  |                                   |                        |                         |
| Flujo de sedimento                   |                                     |                                     |                        | •                                  |                                   |                        |                         |
| Recarga                              |                                     |                                     |                        | •                                  |                                   |                        |                         |
| Evaporación                          |                                     |                                     |                        | •                                  | •                                 | •                      |                         |
| Humedad del suelo                    |                                     |                                     |                        | •                                  | •                                 | •                      |                         |
| Escurrentía                          |                                     |                                     |                        | •                                  | •                                 |                        |                         |
| Agua subterránea                     |                                     |                                     |                        | •                                  | •                                 |                        |                         |
| Desarrollo de las plantas            |                                     |                                     |                        |                                    |                                   | •                      | •                       |
| Polen                                |                                     |                                     |                        |                                    |                                   |                        | •                       |
| Composición del hielo y el sedimento |                                     |                                     |                        |                                    |                                   |                        | •                       |
| Crecimiento de anillos arbóreos      |                                     |                                     |                        |                                    |                                   |                        | •                       |
| Crecimiento de anillos coralinos     |                                     |                                     |                        |                                    |                                   |                        | •                       |
| Sustancias químicas atmosféricas     |                                     |                                     |                        |                                    |                                   | •                      |                         |
| Partículas                           |                                     |                                     |                        |                                    |                                   | •                      |                         |

### 2.2.2 Elementos en altitud

Las observaciones en altitud son un componente integral del SMO. La gama de actividades climáticas en las que se requieren dichas observaciones comprende la vigilancia y detección de la variabilidad del clima y el cambio climático, la predicción climática en todas las escalas temporales, la modelización del clima, los estudios de los procesos climáticos, las actividades de reanálisis de datos y los estudios sobre satélites concernientes a la calibración de las recuperaciones satelitales y la transferencia radiativa.

El registro más largo de observaciones en altitud se ha obtenido mediante instrumentos con globos utilizados conjuntamente con dispositivos de rastreo terrestre en una red de radiosondas. Estas mediciones efectuadas por radiosonda proporcionan una base de datos de variables atmosféricas que datan del decenio de 1930, aunque, por lo general, la cobertura resulta deficiente antes de 1957. El registro de los datos obtenidos por radiosonda se caracteriza por muchas discontinuidades y sesgos que se deben a cambios en los instrumentos y en los procedimientos operativos y a metadatos incompletos. Las observaciones satelitales han estado disponibles desde el decenio de 1970 y algunas de ellas se han agrupado y vuelto a procesar para crear registros continuos. Sin embargo, al igual que el registro de datos obtenidos por radiosonda, los datos satelitales también adolecen de, entre otras cosas, una resolución vertical limitada, la deriva de la órbita, los cambios en las plataformas satelitales, la deriva de los instrumentos, complicaciones con los procedimientos de calibración y la introducción de sesgos debido a las modificaciones de los algoritmos de procesamiento. Asimismo, se han obtenido mediciones en altitud efectuadas desde plataformas móviles tales como aeronaves. Las observaciones realizadas desde emplazamientos de alta montaña también se consideran parte del sistema de mediciones en altitud.

Los principales requisitos de observación para vigilar los cambios que se producen a largo plazo en altitud son:

- a) un registro cronológicamente homogéneo, estable y a largo plazo (multidecenal), al objeto de poder determinar fiablemente si los cambios constituyen verdaderos cambios atmosféricos y no cambios en el sistema de observación o si son producto de los métodos de homogeneización;
- b) una buena resolución vertical para describir la estructura vertical de la temperatura, el vapor de agua y los cambios en el ozono, así como los cambios en la tropopausa;
- c) suficiente cobertura geográfica y resolución, con objeto de poder determinar tendencias mundiales y regionales fiables, y
- d) unas observaciones dotadas de mayor precisión que las variaciones atmosféricas previstas, con el fin de determinar claramente tanto la variabilidad como los cambios a largo plazo. Este requisito es particularmente importante en el caso de las observaciones de vapor de agua en la troposfera superior y la estratosfera.

Los elementos climáticos fundamentales de las observaciones en altitud son: la temperatura, el vapor de agua, la presión, la velocidad y la dirección del viento, las propiedades de las nubes, la radiancia y la radiación (netas, entrantes y salientes), con arreglo a los documentos *Second Report on the Adequacy of the Global Observing Systems for Climate in Support of the UNFCCC* (GCOS-82, WMO/TD-No. 1143) e *Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC* (GCOS-92, WMO/TD-No. 1219). Dado que la composición química de la atmósfera es sumamente importante en la predicción climática, la vigilancia del cambio climático, las predicciones del ozono y otras predicciones de la calidad del aire y en esferas de aplicación tales como el estudio y el pronóstico de la salud y el bienestar de los animales, las plantas y las personas, es importante comprender la estructura vertical de la composición de la atmósfera mundial (véanse el *Reglamento Técnico* (OMM-N° 49), Volumen I, parte I, 6.3, el documento *Plan for the Global Climate Observing System* (GCOS) (GCOS-14, WMO/TD-No. 681), y el documento *GCOS/GTOS Plan for Terrestrial Climate-related Observations* (GCOS-32, WMO-No. 796)). Los elementos de la composición química que es necesario medir tanto en la atmósfera libre como cerca del suelo son las concentraciones en ozono y otros gases de efecto invernadero, tales como el dióxido de carbono y el metano, la turbiedad atmosférica (la profundidad óptica de los aerosoles), la carga total de aerosoles, los gases reactivos y los radionucleidos. También es necesario medir la lluvia ácida (o más generalmente la composición química de la precipitación y las partículas) y la radiación ultravioleta (para más detalles sobre la composición química de la atmósfera, véase el documento *Changing Atmosphere: An Integrated Global Atmospheric Chemistry Observation Theme for the IGOS Partnership*. GAW Report No. 159 (WMO/TD-No. 1235)).

Las mediciones en altitud deberían captar la gama completa de regímenes climáticos y tipos de superficie. Las claves de transferencia radiativa utilizadas para convertir radiancias satelitales sin

procesar en parámetros geofísicos dependen de los supuestos relativos a las condiciones de la superficie. Por lo tanto, deberán representarse diferentes condiciones medioambientales locales, que abarquen tanto las zonas terrestres como las oceánicas.

### 2.2.3 Elementos medidos por teledetección

Los satélites y demás sistemas de teledetección, tales como los radares meteorológicos, proporcionan abundante información complementaria, sobre todo procedente de zonas donde escasean los datos, pero todavía no tienen la capacidad de ofrecer, con la exactitud y homogeneidad necesarias, mediciones de muchos de los elementos de los que informan las estaciones en superficie terrestres. Dada la cobertura espacial que ofrecen, complementan las redes de superficie, pero no las sustituyen. Los elementos que pueden medirse o estimarse por teledetección son: la precipitación (con exactitud limitada en zonas pequeñas, interfaces océano-atmósfera, altiplanicies u orografía escarpada); la nubosidad; los flujos de radiación; el balance de radiación y el albedo; la biomasa de la capa superior del océano, la topografía de la superficie del océano y la altura de las olas; la cubierta de hielo marino; la temperatura de la superficie del mar; los vectores del viento en la superficie del océano y la velocidad del viento; la temperatura atmosférica, los perfiles de la humedad y del viento; los elementos químicos que constituyen la atmósfera; la capa de nieve; la capa de hielo y la extensión de los glaciares; la vegetación y la cubierta terrestre, y la topografía de la superficie terrestre.

La teledetección permite alcanzar una mayor cobertura espacial y temporal que las observaciones *in situ*. Los datos obtenidos por teledetección también complementan las observaciones efectuadas en otras plataformas y resultan particularmente útiles cuando estas últimas no están disponibles o han resultado dañadas. Aunque ello es una ventaja, existen problemas para utilizar directamente los datos obtenidos por teledetección para las aplicaciones climáticas. El problema más importante es que la brevedad del período de registro implica que los datos obtenidos por teledetección no puedan utilizarse para deducir la variabilidad del clima y el cambio climático a largo plazo. Además, es posible que dichos datos no sean comparables directamente con las mediciones *in situ*. Por ejemplo, las estimaciones de la temperatura de la corteza terrestre efectuadas por satélite no son las mismas que las mediciones de la temperatura efectuadas mediante una pantalla corriente, y la relación entre las mediciones de la reflectividad obtenidas por radar y las cantidades de precipitación recogidas mediante pluviómetros puede resultar bastante complejas. Sin embargo, si se procede con cuidado, es posible elaborar series homogéneas que conjugan las mediciones por teledetección con las efectuadas *in situ*.

## 2.3 INSTRUMENTOS

Las estaciones climatológicas que forman parte de una red nacional deberán estar equipadas con instrumentos estándar autorizados; es posible que el SMHN suministre los instrumentos. Cuando los instrumentos sean suministrados por otros organismos o adquiridos por el observador, la entidad climática deberá hacer todo lo posible para garantizar el cumplimiento de las normas nacionales.

En esta sección se ofrece orientación sobre algunos instrumentos básicos en superficie y sobre la elección de los instrumentos. Existen otras publicaciones de la OMM que deben acompañar a esta Guía y deben estar disponibles fácilmente y consultarse cuando sea necesario. En la *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-Nº 8) figura un inventario exhaustivo de instrumentos adecuados para efectuar mediciones del clima y de otros elementos en estaciones terrestres y marinas. La información relativa a los instrumentos necesarios para medir los elementos agrometeorológicos se ofrece en la publicación *Guide to Agricultural Meteorological Practices* (WMO-No. 134), y la relativa a los instrumentos para fines hidrológicos aparece en la *Guía de prácticas hidrológicas* (OMM-Nº 168).

Cuando se escogen los instrumentos, en particular cualesquiera sistemas de proceso de datos y transmisión conexos, deberán adoptarse los diez principios de vigilancia del clima (véase la sección 2.1). Al cumplir estos principios, deberán tenerse en cuenta los siguientes aspectos:



- la fiabilidad;
- la idoneidad para el entorno operativo de la estación en la que se utilizarán;
- la exactitud;
- la simplicidad del diseño, y
- los motivos para la realización de observaciones.

Para que un instrumento sea fiable es preciso que funcione siempre conforme a los requisitos de su diseño. Los instrumentos que no son dignos de confianza conducen a lagunas en los datos, sesgos y otras faltas de homogeneidad. Los instrumentos fiables deben ser lo suficientemente sólidos como para resistir a una serie de fenómenos meteorológicos y físicos extremos que pueden producirse en el emplazamiento y probablemente al manejo inherente a las observaciones manuales.

Los instrumentos deben ser adecuados para el clima en el que deben funcionar y para el resto del equipo con el que deben operar. Por ejemplo, una cabeza de anemómetro situada en un lugar frío tendrá que soportar la congelación, mientras que una situada en una zona desértica habrá de ser protegida para evitar que entre polvo. Los sensores que se utilizan en una estación meteorológica automática deben proporcionar resultados que puedan procesarse automáticamente. Por ejemplo, el termómetro ordinario de mercurio en tubo de vidrio que se emplea en un emplazamiento de registro manual habrá de sustituirse por una sonda sensible a la temperatura, tal como el termopar, cuya respuesta puede convertirse en una señal electrónica. Además, los instrumentos deben estar ubicados de tal manera que permitan su acceso y mantenimiento.

Idealmente, la elección de todos los instrumentos se habrá de hacer buscando el alto nivel de exactitud y precisión que se requiere para fines climatológicos. También es importante que el instrumento pueda continuar ofreciendo el nivel de exactitud necesario durante un largo período de tiempo, ya que una imprecisión en los instrumentos puede dar lugar a una falta de homogeneidad grave en un registro climático; la falta de fiabilidad limita la utilidad de la exactitud.

Cuanto más simples sean los instrumentos, más fácil será utilizarlos y mantenerlos y vigilar su rendimiento. A veces, es necesario instalar sensores redundantes (por ejemplo, termistores triples en estaciones de registro de datos automáticas) para el correcto seguimiento del rendimiento y de la fiabilidad a lo largo del tiempo. Es probable que los sistemas complejos den lugar a una falta de homogeneidad en los datos, una pérdida de datos, un elevado coste del mantenimiento y una exactitud inconstante.

Por lo general, la finalidad de las observaciones determina las mediciones que se requieren. Deberán tomarse en consideración los tipos de instrumentos, la instalación de sensores y las características de los instrumentos para garantizar que se satisfagan esas necesidades. En la *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-Nº 8) puede consultarse información detallada sobre estos temas, en particular, sobre las normas y prácticas recomendadas en relación con los instrumentos y las mediciones.

### 2.3.1 **Equipo de superficie básico**

Pueden ser varias las opciones para obtener observaciones climáticas de estaciones en superficie. Entre dichas opciones está la de equipar a una estación, por ejemplo, con instrumentos básicos, mecanismos de salida autográfica o automática durante los períodos de ausencia del personal o sensores completamente automáticos. Al examinar estas opciones, es importante comparar los costos de personal, mantenimiento y reemplazo. A menudo, es posible negociar los precios con los fabricantes, por ejemplo, de acuerdo con las cantidades adquiridas, entre otras cosas.

En la medida de lo posible, un empleado local capacitado, como por ejemplo un guardián, deberá supervisar regularmente un emplazamiento de observación para vigilar las condiciones de la superficie (como el crecimiento de la hierba), ocuparse del mantenimiento básico de los instrumentos (como la limpieza corriente de los mismos), examinar daños y detectar si se ha quebrantado la seguridad. Estas tareas deberán realizarse al menos semanalmente en las estaciones terrestres accesibles y dotadas de personal. La inspección de los emplazamientos e instrumentos situados en lugares alejados deberá llevarse a cabo tan frecuentemente como sea posible. El personal también deberá estar disponible para ofrecer rápidamente un servicio de mantenimiento cuando se produzcan fallos en los sistemas imprescindibles.

El equipo autográfico y de registro de datos se utiliza para registrar muchos elementos climáticos, tales como la temperatura, la humedad, el viento y la intensidad de la lluvia. Los datos inscritos en los registros autográficos han de transferirse a tablas o a un formato digital. Los observadores deberán garantizar que el equipo esté funcionando correctamente y que la información registrada en mapas, por ejemplo, sea clara e inconfundible. Los observadores deberán encargarse de verificar y evaluar periódicamente los datos registrados (mediante su comprobación con equipo de lectura directa) y de efectuar marcas de tiempo a intervalos frecuentes y concretos. Los datos registrados pueden servir para colmar lagunas y completar el registro cuando las observaciones directas no se realicen por motivos de salud de los observadores y otras causas que llevan a estos a ausentarse de la estación de observación. En la *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-N° 8) se ofrece orientación sobre el mantenimiento y funcionamiento de instrumentos registradores, tambores y aparatos de relojería.

Los datos procedentes de las estaciones meteorológicas automáticas (EMA), en las que los instrumentos registran y transmiten observaciones automáticamente, normalmente se limitan a los que están fácilmente disponibles en forma digital, si bien la gama de sensores es amplia y continúa evolucionando. Dichas estaciones se han utilizado para complementar la labor de las estaciones dotadas de personal y para incrementar la densidad de las redes, la frecuencia de los informes y la cantidad de elementos observados, especialmente en zonas alejadas y muy despobladas de difícil acceso humano. Algunos de los requisitos relativos a la sensibilidad y la exactitud de estas estaciones automáticas figuran en la *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-N° 8); otros están siendo establecidos, especialmente para los estudios de la variabilidad del clima.

En muchos países, las EMA han reducido los costes operativos. Los SMHN que tengan que escoger entre los programas de observación con dotación de personal y los de las EMA deben examinar una serie de cuestiones. A pesar del potencial considerable de las EMA para proporcionar datos de alta frecuencia, así como otros datos procedentes de zonas alejadas, el funcionamiento de una EMA implica varios costos importantes, en particular los gastos en mano de obra para el mantenimiento de la EMA y para garantizar su fiabilidad, la disponibilidad de mano de obra, la accesibilidad para su instalación y mantenimiento, la disponibilidad de fuentes de energía adecuadas, la seguridad del emplazamiento y la infraestructura para las comunicaciones. Estos aspectos deben sopesarse cuidadosamente frente a los beneficios importantes, tales como una red más densa y más amplia. Las EMA pueden representar una alternativa convincente frente a los programas de observación dotados de personal y a veces constituyen la única opción, pero su gestión requiere un firme compromiso organizativo.

Los instrumentos marinos comprenden boyas a la deriva y boyas fondeadas para el acopio de datos, flotadores de hielo y flotadores subsuperficiales (como los flotadores Argo). Si bien los datos se recopilan por teledetección, por lo general, los instrumentos efectúan las mediciones *in situ*. Constituyen un medio eficaz y rentable para obtener datos meteorológicos y oceanográficos relativos a zonas oceánicas lejanas. Por lo tanto, son un componente fundamental de los sistemas de observación marina y de los programas operativos y de investigación en el ámbito de la meteorología y la oceanografía. Por ejemplo, el conjunto de boyas fondeadas de la Observación océano-atmósfera en los mares tropicales ha permitido el acopio oportuno de datos de observación oceanográfica y meteorológica en superficie de gran calidad en el océano Pacífico ecuatorial para la vigilancia, predicción y comprensión de los cambios climáticos relacionados con los fenómenos El Niño y La Niña.



### 2.3.2 Instrumentos de observación en altitud

Históricamente, la mayoría de los datos climatológicos relativos a la atmósfera superior se han derivado de mediciones efectuadas para la predicción sinóptica mediante radiosondas a bordo de globos. Existen diversas técnicas e instrumentos que se emplean para medir la presión, la temperatura, la humedad y el viento, y para convertir la información procedente de los instrumentos en cantidades meteorológicas. Es importante que cada SMHN proporcione a cada estación de observación en altitud manuales de instrucción adecuados que permitan utilizar el equipo e interpretar los datos de manera correcta. Conforme al *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM-N° 544), es preciso informar rápidamente a la Secretaría de la OMM de los cambios en el tipo de radiosonda o los cambios en los sistemas de vientos durante el funcionamiento de la estación en régimen operativo.

Existen varios problemas en relación con la calidad de las mediciones por radiosonda destinadas a la vigilancia del clima y la detección del cambio climático. Los errores debidos a la radiación causan incertidumbre en las observaciones de la temperatura. Las radiosondas normales no son capaces de medir con suficiente exactitud el vapor de agua a bajas temperaturas. Los tipos de sensores, especialmente los que captan la humedad, han cambiado a lo largo del tiempo. La cobertura espacial de las observaciones por radiosonda no es uniforme; la mayoría de las estaciones están situadas en la superficie terrestre del hemisferio norte, mientras que las redes que se encuentran en el hemisferio sur y en los océanos son mucho menos densas. El registro histórico de las observaciones por radiosonda plantea innumerables problemas relacionados con la falta de intercomparaciones entre los tipos de radiosondas y las diferencias entre los sensores y la exposición; los metadatos referentes a los instrumentos y los procedimientos de reducción de datos y de proceso de datos son fundamentales para la utilización de los datos acopiados por radiosonda en las aplicaciones climáticas. Así pues, se están elaborando nuevas radiosondas de referencia para paliar las deficiencias que presentan las radiosondas normales actuales. Una red limitada de estas se utilizará para calibrar y validar diversas observaciones satelitales tanto de la temperatura como del vapor de agua.

Un sistema de observación en altitud puede cambiar a lo largo del tiempo debido a los avances tecnológicos. Por lo tanto, un requisito primordial de la red es la superposición de sistemas para mantener la continuidad y permitir comparar completamente la exactitud y la precisión de los sistemas antiguos y los nuevos. Los sistemas de medición deberán ser calibrados periódicamente en el emplazamiento. Es imprescindible que las estrategias relativas al reemplazo de instrumentos tengan en cuenta los cambios experimentados en otras redes, como la utilización de satélites. El desarrollo y el funcionamiento de un sistema de observación en altitud deberán guiarse por los principios de vigilancia del clima (véase la sección 2.1).

### 2.3.3 Teledetección en superficie

En la teledetección pueden utilizarse tanto sensores activos como pasivos. Los sistemas de sensores activos emiten cierta forma de radiación, que es dispersada por diversos objetivos; los sensores detectan la retrodifusión. Los sensores pasivos miden la radiación que está siendo emitida (o modificada) por el medio ambiente.

La técnica más común de teledetección activa en superficie es la utilización del radar meteorológico. Un sistema de antenas orienta un breve pulso de energía en microondas muy potente hacia un haz estrecho. La precipitación localizada efectúa la retrodifusión de este haz, y, por lo general, el mismo sistema de antenas recibe la radiación retrodifundida. La localización de la precipitación puede determinarse mediante el acimut y la elevación de la antena y el tiempo que transcurre entre que se transmite y se recibe la energía reflejada. La energía de la radiación recibida depende de las características de la precipitación y es posible procesar la señal para estimar su intensidad. Las condiciones atmosféricas y medioambientales pueden afectar negativamente a los datos captados por radar y deberá procederse con cautela al interpretar esa información. Algunos de estos efectos consisten en retornos procedentes de montañas, edificios y otros objetivos distintos de los meteorológicos; la atenuación de la señal de radar cuando se captan ecos meteorológicos a través de las zonas intermedias de intensa precipitación; inversiones de temperatura en las capas bajas de la atmósfera, que inclinan el haz de radar de

tal manera que se observa terreno donde normalmente no se espera, y la banda brillante, que es una capa de reflectividad intensificada causada por la fusión de partículas de hielo a medida que estas atraviesan el nivel de congelación para caer en la atmósfera, lo cual puede conducir a sobrestimar la cantidad de lluvia. La utilización de datos obtenidos por radar en los estudios climáticos se ha visto limitada por las capacidades de acceso y proceso, la incertidumbre de la calibración y los cambios en la calibración y la compleja relación existente entre la reflectividad y la precipitación.

Los perfiladores de viento usan radares para establecer perfiles verticales de la velocidad y la dirección del viento horizontal entre puntos cercanos a la superficie y la tropopausa. Las fluctuaciones de la densidad atmosférica son provocadas por la mezcla turbulenta del aire con diferentes temperaturas y contenido de humedad. Las fluctuaciones del índice de refracción resultante se utilizan como un trazador del viento medio. Si bien son más eficaces cuando la atmósfera está clara, los perfiladores de viento pueden funcionar en presencia de nubes y de una precipitación moderada. Cuando están dotados de un sistema de sondeo radioacústico, los perfiladores también permiten medir y establecer perfiles verticales de la temperatura. La velocidad del sonido en la atmósfera se ve afectada por la temperatura. Se rastrea la trayectoria de la energía acústica a través de la atmósfera y, a partir de la velocidad de la propagación de la onda acústica, se estima el perfil de la temperatura.

La detección de relámpagos es el tipo de teledetección pasiva en superficie más común. Los sensores de relámpagos efectúan el barrido de una gama de frecuencias electromagnéticas para detectar descargas eléctricas dentro de las nubes, entre las nubes o entre las nubes y el suelo. Se miden las características de la radiación recibida (tales como la amplitud, el tiempo de llegada, la dirección de la fuente, el signo y otras características de la forma de onda) y, a partir de ellas, se deducen las características del relámpago. Un solo sensor no puede localizar con exactitud los relámpagos, por lo que se concentran datos de varios sensores en un punto central de un procesador central de relámpagos. El procesador calcula y combina datos correspondientes a varios sensores para determinar la localización y las características de los relámpagos observados. La exactitud y eficacia de la red de detectores de relámpagos disminuye progresivamente fuera de sus límites. La onda detectada se propagará sin gran atenuación en la distancia, en función de la banda de frecuencias utilizada, pero si un relámpago se produce en un punto demasiado lejano de la red (esta distancia varía en función de la amplitud de la descarga y la configuración de la red), es posible que la descarga resulte indetectable.

### 2.3.4 **Teledetección desde aeronaves y por satélite**

Muchas aeronaves que efectúan vuelos de larga distancia están dotadas de sistemas de registro automáticos que, durante el vuelo, informan periódicamente de la temperatura y el viento y, en algunos casos, de la humedad. Algunas aeronaves registran y notifican observaciones frecuentes durante el despegue y el descenso para incrementar notablemente los datos obtenidos mediante radiosondas convencionales, al menos en el conjunto de la troposfera. Dichos datos se incorporan en sistemas de análisis meteorológicos operativos y, mediante programas de reanálisis, contribuyen sustancialmente a ampliar el registro climático.

Los sistemas de retransmisión de datos meteorológicos de aeronaves funcionan en aviones que están dotados de sistemas de navegación y detección. Existen sensores para medir la velocidad, la temperatura y la presión del aire. Otros datos relativos a la posición, aceleración y orientación de la aeronave están disponibles en el sistema de navegación de la aeronave. La aeronave también transporta a bordo computadoras para la gestión de vuelo y sistemas de navegación, que calculan continuamente los datos meteorológicos y de navegación que se ponen a disposición de la tripulación. Los datos se introducen automáticamente en el sistema de comunicación de la aeronave para su transmisión a tierra o, como alternativa, se puede utilizar en la aeronave un programa de proceso especial para acceder a los datos brutos desde los sistemas de la aeronave y obtener de forma independiente las variables meteorológicas. Normalmente, en los mensajes transmitidos a estaciones en tierra se indica la dirección y velocidad del viento horizontal, la temperatura del aire, la altitud (relativa a un nivel de presión de referencia), una

medida de la turbulencia, la hora de la observación, la fase del vuelo y la posición de la aeronave. Estos datos son utilizados por los controladores aéreos para garantizar la seguridad de los vuelos y por los pronosticadores meteorológicos.

Existen numerosas fuentes de error posibles que contribuyen a la incertidumbre de las mediciones efectuadas por aeronaves. Es previsible que el proceso de cálculo suponga una incertidumbre aproximada de entre un 5 % y un 10 %. Otra complicación es la que plantea la elección del intervalo de muestreo y el tiempo de promediación. A menudo, las series temporales de los datos de la aceleración vertical características muestran una gran variabilidad de las propiedades estadísticas en distancias cortas. La variación de la velocidad del aire de acuerdo con una sola aeronave y entre diferentes tipos de aeronaves altera las distancias de muestreo y modifica las longitudes de onda filtradas. Si bien no son tan precisos y exactos como la mayoría de los sistemas de observación terrestres, los datos recopilados por aeronaves pueden proporcionar información complementaria útil para las bases de datos meteorológicos.

Los datos obtenidos por satélite añaden información valiosa a las bases de datos climáticos gracias a su amplia cobertura geográfica, especialmente en zonas caracterizadas por la escasez o carencia absoluta de datos *in situ*. Los satélites son muy útiles para el seguimiento de fenómenos como la extensión del hielo marino polar, la capa de nieve, la actividad glaciaria, los cambios en el nivel del mar, la cubierta vegetal y el contenido de humedad y la actividad ciclónica tropical. También ayudan a mejorar los análisis sinópticos, componente importante de la climatología sinóptica.

Las técnicas de detección hacen uso de las propiedades de emisión, absorción y difusión de la atmósfera y la superficie de la Tierra. Las ecuaciones físicas relativas a la transferencia radiativa proporcionan información sobre las propiedades radiativas de la atmósfera y la superficie de la Tierra y, mediante la inversión de la ecuación de transferencia radiativa, sobre propiedades geofísicas tales como los perfiles de la temperatura y la humedad, la temperatura de la corteza de la superficie y las propiedades de las nubes.

Las figuras y especificaciones relativas a las plataformas y los sensores satelitales figuran en el documento *Statement of Guidance Regarding How Well Satellite Capabilities Meet WMO User Requirements in Several Application Areas* (SAT-22, WMO/TD-No. 992). Los elementos, la exactitud y la resolución espacial y temporal de los datos que miden los satélites pueden consultarse en las siguientes publicaciones: *Report of the Capacity-building Training Workshop on Reducing the Impacts of Climate Extremes on Health* (WCASP-No. 59, WMO/TD-No. 1162), capítulo 1; *Guideline for the Generation of Satellite-based Datasets and Products Meeting GCOS Requirements* (GCOS-128, WMO/TD-No. 1488), sección 4; y el documento mencionado anteriormente, a saber, WMO/TD-No. 992, sección 3.1 y anexo A.

El historial y los planes futuros en relación con las plataformas y los sensores satelitales se exponen en el documento *Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate* (GCOS-107, WMO/TD-No. 1338). La tecnología de la teledetección va progresando rápidamente y ello puede llevar a modificar de vez en cuando los planes operativos relativos a las plataformas y los sensores. Por lo tanto, será necesario remitirse a los documentos más recientes para hacer uso de los datos obtenidos por teledetección. Los informes publicados por el Comité sobre Satélites de Observación de la Tierra, disponibles en Internet, son útiles para encontrar la información más reciente sobre satélites.

Al igual que los instrumentos de teledetección de superficie, los sensores satelitales y demás sensores aerotransportados pueden clasificarse en dos grupos, a saber, pasivos y activos. Los sensores pasivos abarcan reproductores de imágenes, radiómetros y sondas. Estos miden la radiación emitida por la atmósfera o por la superficie de la Tierra. Sus mediciones se convierten en información geofísica, como los perfiles verticales del vapor de agua, la temperatura y el ozono; información sobre las nubes; las temperaturas de la superficie oceánica y terrestre, y el color de los océanos y la tierra. La longitud de onda que emplea un sensor influye en la información obtenida, y las diferentes longitudes de onda tendrán diferentes ventajas y desventajas.

Los sensores activos comprenden los radares, los difusómetros y los radares de detección y localización por ondas luminosas (lidar). Se emplean para medir la señal retrodifundida procedente de un objetivo de observación cuando lo ilumina una fuente de radiación emitida desde la plataforma. Ofrecen la ventaja de que permiten conocer la distancia exacta de un objetivo de observación midiendo un tiempo de respuesta entre una emisión y su retorno, mientras que la utilización de un haz direccional y bien enfocado puede facilitar datos sobre su posición. Las señales retrodifundidas pueden ser convertidas en datos sobre velocidad y dirección del viento, la altura dinámica del océano y el espectro de las olas, la rotación de la tensión del viento oceánico y el flujo geostrófico, las propiedades de las nubes, la intensidad de la precipitación e inventarios de la extensión glacial.

A veces, puede extraerse información de datos satelitales que, en un principio, no estaba destinada a fines climatológicos. Por ejemplo, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) utiliza una red de decenas de satélites para prestar ayuda a la navegación. Sin embargo, a partir de la medición del retraso en la propagación de las señales del Sistema, es posible estimar el contenido del vapor de agua atmosférico.

Los satélites de observación del medio ambiente con fines operativos se han puesto en dos órbitas complementarias: la órbita geoestacionaria y la órbita polar. Los satélites geoestacionarios, situados a unos 36 000 kilómetros sobre el ecuador, orbitan la Tierra una vez cada 24 horas. Por lo tanto, los satélites permanecen estacionarios respecto de la Tierra y pueden así ofrecer una capacidad de vigilancia constante y la capacidad para rastrear características atmosféricas y deducir datos sobre los vientos. Los satélites de órbita polar se sitúan normalmente a unos 800 kilómetros de la superficie, desplazándose casi en dirección norte-sur respecto de Tierra. La observación de la mayor parte del globo se efectúa dos veces al día, a intervalos de alrededor de 12 horas, utilizando una serie de instrumentos de los satélites de órbita polar operativos. El inconveniente de efectuar solo dos pases por día se compensa con la alta resolución espacial y la mayor gama de instrumentos transportados, así como con la capacidad de percibir altas latitudes que se captan escasamente desde la órbita geoestacionaria.

La comunidad climática debe reconocer la necesidad de que tanto las mediciones "brutas" obtenidas por teledetección como los datos procesados para fines climáticos deberán administrarse como datos científicos. Además de los diez principios enumerados en la sección 2.1, los sistemas satelitales deberán también seguir los siguientes principios:

1. Se mantendrá un muestreo constante a lo largo del ciclo diurno (para reducir al mínimo los efectos del decaimiento y deriva de la órbita).
2. Se garantizará una superposición de las observaciones durante un tiempo suficiente para determinar los sesgos intersatelitales.
3. Se asegurará la continuidad de las mediciones satelitales (eliminando las lagunas del registro a largo plazo) mediante estrategias adecuadas de lanzamiento y operación en órbita.
4. Antes del lanzamiento, los instrumentos serán objeto de una caracterización y calibración rigurosas y, en particular, se confirmará la radiancia tomando como referencia una escala internacional de radiancia proporcionada por un instituto nacional de metrología.
5. Se efectuará una calibración de los instrumentos a bordo que sea adecuada para las observaciones del sistema climático y se supervisarán las características de los instrumentos conexos.
6. Se mantendrá la creación de productos climáticos prioritarios en régimen operativo y se introducirán, conforme proceda, nuevos productos examinados por homólogos.
7. Se establecerán y mantendrán sistemas de datos necesarios para facilitar el acceso de los usuarios a los productos climáticos, a los metadatos y a los datos en bruto, y en particular a los datos más importantes para el análisis en modo diferido.

8. Se mantendrá durante el mayor tiempo posible el uso de instrumentos de referencia operativos que respondan a los requisitos de calibración y estabilidad anteriormente mencionados, aun cuando estén instalados en satélites que hayan dejado de prestar servicio.
9. Se seguirán efectuando, mediante las actividades y la cooperación adecuadas, observaciones de referencia *in situ* complementarias de las mediciones satelitales.
10. Se determinarán los errores aleatorios y los errores sistemáticos dependientes del tiempo en las observaciones satelitales y en los productos de ellas obtenidos.

El *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM-N° 544) aporta orientaciones para diversos componentes de los sistemas de observación.

### 2.3.5 Calibración de instrumentos

Para determinar las variaciones espaciales y temporales del clima, es de suma importancia que la exactitud relativa de los distintos sensores que se utilizan en una red en un momento dado se mida y se verifique periódicamente y, de modo parecido, que el rendimiento de los sensores y los sistemas de reemplazo sea afín al de los instrumentos reemplazados. En el *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM-N° 544) se establece que todas las estaciones deberán estar dotadas de instrumentos debidamente calibrados. En la *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-N° 8) se ofrece información detallada sobre las técnicas de calibración. En general, en el campo de la climatología, no es suficiente basarse en las calibraciones de los fabricantes y es erróneo suponer que la calibración no se desplazará ni cambiará con el tiempo.

Se deberán comparar las mediciones obtenidas de instrumentos o sistemas mediante instrumentos patrón portátiles cuando se reemplacen los instrumentos de una estación y en cada inspección periódica de la misma (véase la sección 2.6.6). Los instrumentos patrón portátiles deberán verificarse tomando como referencia los patrones nacionales antes y después de cada desplazamiento y deben ser suficientemente sólidos como para ser transportados y soportar los cambios de calibración. Deberán mantenerse registros de los cambios en los instrumentos y de las derivas en la calibración, que deberán poder consultarse en forma de metadatos, ya que son fundamentales para la evaluación de las verdaderas variaciones climáticas (véase la sección 2.6.9).

Durante las inspecciones de las EMA situadas en zonas alejadas, las observaciones deberán efectuarse utilizando patrones portátiles para su posterior comparación con la información de las EMA registrada, recibida en el punto de recepción de los datos. Algunos SMHN han establecido procedimientos de detección automática de fallos o derivas en los instrumentos, los cuales permiten comparar las mediciones hechas individualmente con las procedentes de una red y con valores analizados a partir de campos ajustados numéricamente. Estos procedimientos son útiles para detectar no solamente las derivas, sino también cambios escalonados anómalos.

Algunos SMHN utilizan sus propias instalaciones de calibración o recurren a empresas de calibración acreditadas. En el contexto de la OMM, las entidades de calibración regionales están a cargo de mantener y calibrar los patrones, certificar la conformidad de un instrumento con las normas, organizar evaluaciones de los instrumentos y ofrecer orientación acerca del rendimiento de los mismos.

En el documento *GCOS Plan for Space-based Observations* (WMO/TD-684) se ofrece información detallada sobre la calibración, los registros de superposición de la intercalibración y los requisitos relativos a los metadatos con respecto a la teledetección espacial. El plan del Sistema Mundial de Intercalibración Espacial consiste en comparar las radiancias medidas simultáneamente por pares de satélites en el punto de cruce de sus trazas, en particular donde se cruzan un satélite de órbita polar y otro de órbita geoestacionaria. Esta intercalibración ofrecerá una calibración coherente a nivel mundial en régimen operativo.



Para la calibración de los radares meteorológicos se requieren mediciones de las características del sistema tales como la frecuencia y la potencia transmitidas, la ganancia de antena, la anchura de haz, la salida del receptor y las pérdidas por filtro. La supervisión del rendimiento garantiza que otras características del sistema, tales como la orientación de la antena, los lóbulos laterales, la duración y la forma del impulso, los diagramas de haz y los niveles de ruido del receptor, se mantengan dentro de límites aceptables.

Las derivas de los sensores para la detección de relámpagos o los parámetros del procesador central de relámpagos son problemas que deberán detectarse mediante el análisis periódico de datos (por ejemplo, efectuando la verificación cruzada del comportamiento del sensor y el análisis de los parámetros de la descarga). También se deberán establecer comparaciones con otras observaciones del comportamiento de los relámpagos, tales como observaciones manuales de "se oyen truenos" o "relámpagos visibles", u observaciones de nubes Cumulonimbus. Como en el caso de los radares meteorológicos, la supervisión y calibración de las características del sistema deberían ser actividades ordinarias.

## 2.4 EMPLAZAMIENTO DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

Los requisitos concretos para la exposición de los instrumentos empleados en las estaciones climáticas, cuyo objetivo es mejorar al máximo la exactitud de las mediciones de los instrumentos, se examinan en el *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM-N° 544), parte III, la *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-N° 8) y el documento *Representativeness, Data Gaps and Uncertainties in Climate Observations* (WMO/TD-No. 977). Estas publicaciones son un complemento necesario a la presente Guía.

El carácter representativo y la homogeneidad de los registros climatológicos guardan estrecha relación con el emplazamiento de la estación de observación. Es probable que una estación ubicada en o cerca de una pendiente pronunciada, una cordillera, un acantilado, una hondonada, un edificio, una pared u otra obstrucción proporcione datos que sean más representativos del emplazamiento en sí y no de una zona más extensa. Una estación que se vea o vaya a verse afectada por el crecimiento de la vegetación, incluso cuando el crecimiento de los árboles cerca del sensor sea limitado, el crecimiento de cultivos altos y de los bosques aledaños, la construcción de edificios en terrenos adyacentes, o el aumento (o disminución) de la circulación por carretera o el tráfico aéreo (en particular los debidos a los cambios en la utilización de las pistas y las calles de rodajes) proporcionará datos que no serán ni ampliamente representativos ni homogéneos.

Una estación de observación climatológica deberá estar situada en un emplazamiento que permita la correcta exposición de los instrumentos y ofrezca la vista más amplia posible del cielo y de los alrededores, si se requieren datos visuales. Las estaciones climatológicas ordinarias y principales deberán estar situadas en una parcela de terreno plano cubierto de césped corto; el emplazamiento deberá estar suficientemente alejado de árboles, edificios, paredes y pendientes pronunciadas y no deberá estar en una hondonada. Una parcela de unos 9 metros por 6 metros es suficiente para los instrumentos que detectan la temperatura y la humedad exteriores y una superficie de 2 metros por 2 metros de suelo desnudo dentro de la parcela resulta ideal para las observaciones del estado del suelo y las mediciones de su temperatura. Si en el emplazamiento se va a instalar un pluviómetro, además de otros sensores, es preferible que la parcela sea un poco más grande (10 metros por 7 metros).

Muchos SMHN aplican una norma según la cual la distancia de cualquier obstáculo, incluido el cercado, desde el pluviómetro deberá ser dos veces mayor, pero preferentemente cuatro veces mayor, a la altura del objeto que esté por encima del instrumento de medida. En general, los anemómetros deben situarse a una distancia del obstáculo al menos 10 veces mayor, pero preferiblemente 20 veces mayor, a la altura del obstáculo. Los diferentes requisitos de exposición de diversos instrumentos pueden dar lugar a un emplazamiento dividido, en el que algunos elementos se observan desde un punto mientras que otros se observan desde la proximidad, y cuyos datos se agrupan bajo un identificador de emplazamiento.

Un aspecto muy importante es prohibir la entrada de personas no autorizadas. A tal efecto, es posible que sea necesario cercar el emplazamiento. Es importante que dichas medidas de seguridad no perjudiquen la exposición del emplazamiento. Normalmente, las estaciones automáticas necesitarán un elevado nivel de seguridad para impedir la entrada de animales o personas no autorizadas; también requieren un equipo de suministro energético adecuado y robusto y, probablemente, también necesiten que se las dote de protección contra las crecidas, residuos de hojas y ventiscas de arena.

Las estaciones climatológicas ordinarias y principales deberán estar situadas en emplazamientos tales y estar sujetas a condiciones administrativas tales que permitan el funcionamiento permanente de la estación, sin variar su exposición, durante un decenio o más. En el caso de las estaciones utilizadas o establecidas para determinar el cambio climático a largo plazo, como las estaciones climatológicas de referencia y otras estaciones básicas de la red del SMOC, se requiere que la exposición y el funcionamiento sean constantes durante muchos decenios.

Los emplazamientos e instrumentos de observación deberán recibir un mantenimiento adecuado de modo que la calidad de las observaciones no empeore significativamente entre las inspecciones de las estaciones. La planificación del mantenimiento preventivo habitual comprende la realización periódica de tareas de mantenimiento en los emplazamientos de observación (por ejemplo, el corte de césped y la limpieza de las superficies de los instrumentos expuestos, en particular, las garitas para termómetros) y las verificaciones de instrumentos recomendadas por los fabricantes. Las verificaciones ordinarias de control de calidad llevadas a cabo en la estación o en un punto central deberán tener por fin detectar las fallas de los instrumentos lo antes posible. En función del tipo de falla encontrada y del tipo de estación, los instrumentos deberán reemplazarse o repararse de acuerdo con las prioridades y los intervalos de tiempo acordados. Es especialmente importante mantener un registro de las fallas de los instrumentos y de las medidas adoptadas para repararlas cuando los datos se emplean para fines climatológicos. Este registro formará la base fundamental de los metadatos del emplazamiento y ello lo convierte en una parte integral del registro climático. En la *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-N° 8, 1.2.5.2) puede encontrarse información detallada sobre el mantenimiento del emplazamiento de las estaciones.

Existen otras restricciones respecto del emplazamiento que conciernen a las estaciones de la VAG establecidas para proporcionar datos sobre la composición química de la atmósfera, como se indica en el *Reglamento Técnico* (OMM-N° 49), Volumen I, parte I, 6.1. Estas restricciones abarcan la necesidad de que no se produzcan cambios importantes en las prácticas de utilización de las tierras situadas a menos de 50 kilómetros del emplazamiento y la ausencia de los efectos de la contaminación local y regional provocada, por ejemplo, por los principales centros de población, las actividades industriales y de agricultura extensiva, las autopistas, la actividad volcánica y los incendios forestales. Tanto las estaciones mundiales como regionales de la VAG deberán estar situadas a menos de 70 kilómetros de una estación sinóptica en altitud.

Las características de los entornos urbanos hacen que sea imposible seguir las pautas para la elección del emplazamiento y la exposición de los instrumentos que se requieren para establecer un registro homogéneo que pueda utilizarse para describir el clima a gran escala. Sin embargo, los emplazamientos urbanos tienen su propia utilidad para vigilar cambios verdaderos en el clima local que pueden ser importantes para una serie de aplicaciones. Las directrices relativas a la elección de emplazamientos urbanos, la instalación de equipos y la interpretación de observaciones figuran en el documento *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites* (WMO/TD-No. 1250). La necesidad de comprender claramente el motivo por el que se efectúan las observaciones y de obtener mediciones que sean representativas del medio ambiente urbano es fundamental para la orientación al respecto. En muchos contextos urbanos, será posible ajustarse a las prácticas habituales, pero tal vez se deba ser flexible en cuanto al emplazamiento de las estaciones urbanas y los instrumentos. Estas características ponen de relieve aún más la importancia de mantener metadatos que describan exactamente el marco en el que se sitúan la estación y los instrumentos.



## 2.5 DISEÑO DE LAS REDES CLIMATOLÓGICAS

Una red de estaciones consiste en varias estaciones del mismo tipo (tales como un conjunto de estaciones pluviométricas, estaciones de medición de la radiación o estaciones climatológicas), que se administran como un grupo. Cada red deberá optimizarse para proporcionar los datos y funcionar debidamente a un costo razonable. La mayoría de los métodos de optimización se basan en datos de una red ya existente, que ha estado disponible durante un período suficientemente largo como para documentar correctamente las propiedades de los campos meteorológicos. Se basan en análisis estadísticos tanto temporales como espaciales de series temporales. *A priori*, es difícil evaluar cuán largas deben ser las series de datos debido a que el número de años necesarios para captar las características de variabilidad y cambio pueden variar según el elemento climático. En general, se considera que se necesitan por lo menos 10 años de observaciones diarias para elaborar los parámetros estadísticos de referencia pertinentes para la mayoría de los elementos y al menos 30 años para la precipitación. Sin embargo, las tendencias climáticas observadas a nivel mundial y regional en muchas zonas del mundo durante el último siglo indican que unos períodos de registro tan cortos tal vez no sean particularmente representativos de futuros períodos semejantes.

La determinación de estaciones redundantes permite a los administradores de las redes considerar posibles opciones para optimizarlas, por ejemplo, mediante la eliminación de estaciones redundantes para reducir los costos o bien la utilización de los recursos para establecer estaciones en emplazamientos en los que se necesitan las observaciones para alcanzar más eficazmente los objetivos de la red. Los administradores de las redes deberían sacar provecho de la coherencia espacial relativamente elevada que existe en algunos campos meteorológicos, como la temperatura. Las técnicas empleadas para evaluar cuán redundante es una información comprenden la utilización de la matriz de varianza-covarianza espacial de las estaciones disponibles, la regresión lineal múltiple, el análisis canónico y los experimentos de simulación del sistema de observación (véase el capítulo 5).

La densidad y distribución de las estaciones climatológicas que se establecerán en una red terrestre de una zona dada dependen de los elementos meteorológicos que vayan a observarse, la topografía y la utilización de las tierras en la zona y las necesidades de información de los elementos climáticos concretos en cuestión. La proporción en la que varían los elementos climáticos en una zona diferirá de un elemento a otro. Una red poco densa es suficiente para el estudio de la presión de la superficie; una red bastante densa lo es para el estudio de la temperatura máxima y mínima, y una muy densa, para examinar la climatología de la precipitación, el viento, las heladas y la niebla, sobre todo en regiones de topografía pronunciada.

Las estaciones deberán estar localizadas de manera que proporcionen características climáticas representativas que se ajusten a todos los tipos de terreno, como llanuras, montañas, mesetas, costas e islas, y la cubierta de la superficie, como bosques, zonas urbanas, zonas agrícolas y desiertos de la zona correspondiente. La densidad de la estación deberá determinarse según la finalidad de las observaciones y el uso que se hará de los datos. Por lo que se refiere a los datos utilizados para aplicaciones sectoriales en una zona, tal vez se necesite una mayor densidad de estaciones en los lugares en que las actividades o la salud humanas son sensibles al clima, y menos densidad donde haya menos personas. Al planificar una red terrestre, a menudo se ha de adoptar una solución intermedia entre la densidad ideal de las estaciones y los recursos disponibles para instalar, explotar y administrar dichas estaciones.

La distribución de las estaciones de la Red Sinóptica Básica Regional (RSBR), a partir de las cuales se recopilan mensualmente datos climatológicos en superficie, debería ser lo suficientemente densa como para suministrar una descripción precisa de la atmósfera a los usuarios de las observaciones.

La red de estaciones climatológicas debería representar de manera satisfactoria las características climáticas de todos los tipos de terreno del territorio del Miembro interesado (por ejemplo, llanuras, regiones montañosas, mesetas, litorales e islas). Se establecerán Redes Sinópticas Básicas Regionales de estaciones de observación en superficie y en altitud y Redes Climatológicas

Básicas Regionales (RCBR) de estaciones climatológicas para atender las necesidades señaladas por las asociaciones regionales (véase el *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM-Nº 544), parte III, 2.1.3.2).

Cada Miembro deberá establecer y mantener en funcionamiento por lo menos una estación climatológica de referencia para determinar las tendencias climáticas. Dichas estaciones deberán proporcionar registros homogéneos efectuados durante más de 30 años y estar situadas en emplazamientos en los que los cambios medioambientales de origen antropogénico hayan sido mínimos y se prevé que sigan siéndolo. La información sobre las redes y emplazamientos agrometeorológicos e hidrometeorológicos puede consultarse en la publicación *Guide to Agricultural Meteorological Practices* (WMO-No. 134) y la *Guía de Prácticas Hidrológicas* (OMM-Nº 168), respectivamente, y se ofrece mayor orientación en el *Manual del Sistema Mundial Integrado de Sistemas de Observación de la OMM* (OMM-Nº 1160).

A menudo, las actividades de información sobre el medio ambiente de un país las llevan a cabo muchas partes cuyas contribuciones son complementarias y, a veces, se superponen. Un país se beneficia de la información medioambiental que recopilan y difunden tanto organismos gubernamentales como entidades no gubernamentales (en particular, empresas privadas, empresas de servicios públicos y universidades). Las asociaciones oficiales establecidas entre los SMHN y esas otras partes son muy convenientes para optimizar los recursos. Dado que, normalmente, los datos y la información procedentes de fuentes distintas de un SMHN no están bajo el control del SMHN, los metadatos son fundamentales para utilizar la información de la manera más eficaz. En cuanto a las estaciones cuya explotación mantiene el SMHN, deberán obtenerse y documentarse los metadatos sobre los instrumentos, el emplazamiento, los procedimientos para el proceso, los métodos y cualquier otro elemento que mejoraría el uso de la información. Además, los metadatos deberán recibir un mantenimiento y ser accesibles. Para fomentar el intercambio abierto y sin restricciones de información sobre el medio ambiente, en particular, las observaciones meteorológicas, sería muy aconsejable que se permitiera a los SMHN el pleno uso de todos los datos e información climática procedentes de sus asociados, sin restricción, como si se tratara de sus propios datos. Para ello, tal vez sea necesario redactar y firmar un contrato o un memorando de entendimiento entre la dirección general del SMHN y de otras organizaciones.

Además de los datos recopilados por las redes climatológicas ordinarias y privadas, a veces, hay datos de observación procedentes de redes temporales establecidas en relación con programas de investigación y estudio, así como mediciones efectuadas en transectos y perfiles móviles. El SMHN deberá tratar de obtener estos datos y los metadatos conexos. Aunque puede que los datos no sean ideales para el archivado convencional, a menudo resultan muy útiles a modo de información complementaria, por ejemplo, para las investigaciones de fenómenos extremos concretos. Cuando estas observaciones proceden de zonas de las que escasean los datos, resultan sumamente valiosas.

## 2.6 FUNCIONAMIENTO DE LAS ESTACIONES Y LAS REDES

El material orientativo presentado en esta sección se refiere principalmente a las observaciones efectuadas en estaciones climatológicas ordinarias (en las que las observaciones suelen hacerse dos veces al día y, en algunos casos, solo una vez, y abarcan lecturas de temperaturas extremas y precipitaciones). También se ofrece orientación sobre las estaciones pluviométricas (en las que se realizan una o más observaciones al día de la precipitación únicamente). El material normativo y orientativo referente a las estaciones climatológicas principales (que también suelen funcionar como estaciones de observación sinópticas) y otros tipos de estaciones climatológicas figura en el *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM-Nº 544).

### 2.6.1 Horas de observación

En las estaciones climatológicas ordinarias y en las pluviométricas, las observaciones deberían hacerse como mínimo una vez al día (aunque preferiblemente dos veces) en horas fijas que

permanezcan inalteradas durante todo el año. En las estaciones climatológicas principales, las observaciones deberán hacerse como mínimo tres veces al día, además de las lecturas horarias efectuadas según datos registrados autográficamente, si bien las observaciones no autográficas se efectúan habitualmente cada hora. Desde un punto de vista práctico, es conveniente que las horas de observación se ajusten a la jornada de trabajo del observador, lo que supone, por lo general, una observación por la mañana y otra por la tarde. Si durante parte del año se modificase la hora local para aprovechar más la luz del día, las observaciones deberán continuar siendo hechas a la hora local fijada. Se deberá registrar la fecha en la que comienza y termina la hora de verano. De ser posible, las horas de observación deberán coincidir con las horas normales, principales o intermedias, de las observaciones sinópticas (por ejemplo, a las 00.00, 03.00, 06.00 UTC, etc.). Si las condiciones dictaminaran que solo es posible una observación al día, esta deberá realizarse entre las 07.00 y las 09.00, hora local normal.

Al seleccionar las horas del día para hacer las observaciones climatológicas, deberán evitarse las horas exactas o aproximadas en las que normalmente se producen las temperaturas mínima y máxima diarias. Las cantidades de precipitación y la temperatura máxima obtenidas en una observación hecha a primeras horas de la mañana deberán ser asignadas al día anterior, mientras que la temperatura máxima registrada en una observación hecha por la tarde o al anochecer deberá ser asignada al día en el cual fue observada.

A menudo, las horas de observación varían en función de las redes. Las observaciones sumarias tales como las temperaturas extremas o las precipitaciones totales correspondientes a un período de 24 horas (por ejemplo, desde las 08.00 horas de un día hasta las 08.00 del día siguiente) no son equivalentes a las efectuadas con respecto a un período distinto de 24 horas (por ejemplo, desde las 00.00 hasta 24.00 horas).

Cuando en el conjunto de una red se modifiquen las horas de las observaciones, se deberán efectuar observaciones simultáneas en una red básica de estaciones representativas, durante un período que abarque las estaciones climáticas más características de la zona a las horas de observación antiguas y nuevas. Estas observaciones simultáneas deberán evaluarse para determinar si se han producido sesgos como resultado del cambio en las horas de observación. Los identificadores de estación relativos a las horas antiguas y a las horas nuevas de observación deben ser únicos para la emisión de informes y el archivado.

## 2.6.2 Registro y comunicación de las observaciones

Inmediatamente después de haber hecho una observación en una estación manual, el observador deberá transcribir los datos en un libro de anotaciones, diario o registro, que se conserva en la estación con este propósito. Otra posibilidad es que la observación se introduzca o se transcriba inmediatamente en una computadora o un equipo terminal de transmisión o en una base de datos. En algunos países, la legislación o los órganos jurídicos (tales como los tribunales de justicia) tal vez requieran que se conserve un registro en papel o una copia impresa de los datos originales introducidos para su uso como prueba en casos jurídicos, ya que pueden surgir dificultades para aceptar la información generada por la base de datos. El observador debe garantizar que se haya efectuado un registro completo y exacto de la observación. Con una periodicidad específica (desde inmediatamente después hasta una vez al mes), en función de las necesidades del SMHN, los datos deben ser transferidos del registro de la estación (en particular la base de datos informática) a un formulario de registro específico para su transmisión, ya sea por correo o electrónicamente, a la oficina central.

El personal de la estación climatológica deberá velar por que en el formulario se haya copiado correctamente la información pertinente. En el caso de registros anotados en papel, deberá subrayarse que es necesario escribir con letra adecuada y clara y que los diarios e informes deberán tener una presentación cuidadosa. Es bastante frecuente que en el registro local se introduzca más información, tal vez relativa a fenómenos y acontecimientos meteorológicos inusuales, de la que requiere la oficina central. El registro efectuado debe conservarse en la estación y ser fácilmente accesible para que el personal pueda responder a cualquier

averiguación de la oficina central respecto de posibles errores u omisiones en el formulario de informe. Algunos servicios solicitan a los observadores que envíen los libros de anotaciones al centro nacional sobre el clima para que se archive permanentemente.

Algunos centros nacionales sobre el clima exigen que el personal de la estación calcule e incluya los totales de precipitación y los promedios de temperatura mensuales, a fin de facilitar el control de los datos en la división o en la oficina central. Además, si procede, el centro sobre el clima o el observador deberá codificar datos para los mensajes CLIMAT, como se indica en el *Manual sobre la preparación de informes CLIMAT y CLIMAT TEMP* (OMM/DT-N° 1188). La OMM ha desarrollado programas informáticos para codificar los datos. El observador deberá indicar en el libro de anotaciones de la estación y en los formularios de registro el momento en que se produzca cualquier daño o falla que experimenten los instrumentos y su naturaleza, las actividades de mantenimiento y cualquier cambio en el equipo o en la exposición de la estación, puesto que tales acontecimientos podrían afectar notablemente a los datos observados y, por ende, al registro climatológico. Cuando corresponda, se deberán dar instrucciones para transmitir las observaciones electrónicamente. Si la transmisión va a efectuarse por correo, se deben dar instrucciones a la estación para su expedición, así como sobres franqueados donde ya figuren las señas para enviar los formularios de registro a la oficina central sobre el clima.

### 2.6.3 Control de calidad *in situ*

En el *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM-N° 544), parte III, 2.7.3, se ofrece orientación general sobre el control de la calidad *in situ* de las observaciones y los informes, y en la *Guía del Sistema Mundial de Observación* (OMM-N° 488), parte III, 3.1.3.14, y parte VI, se ofrece orientación detallada al respecto. Los procedimientos que se especifican a continuación deberán seguirse cuando haya un observador u otro miembro del personal competente en el emplazamiento.

Deberán verificarse los errores importantes, en relación con los extremos existentes, la coherencia interna de una secuencia de observaciones, la coherencia de la secuencia de las fechas y horas de observación, la coherencia con otros elementos y cálculos, y la exactitud de las copias y los informes codificados. Estas verificaciones pueden hacerse manualmente o mediante procedimientos automáticos. Si se detectan errores, estos deberían subsanarse, procediendo, por ejemplo, a corregir los datos originales y el informe, antes de su transmisión. También deberán corregirse los errores que se detecten después de la transmisión; en tal caso, deberá transmitirse el informe corregido. Asimismo, deberán hacerse verificaciones y registrar las enmiendas necesarias y transmitir las correcciones, si se recibe una solicitud sobre la calidad de los datos desde una fuente externa. Los registros de una observación original que contenga un error deberán incluir una nota o una señal que indique que el valor original es erróneo o dudoso. El control de calidad *in situ* deberá comprender también el mantenimiento de la exposición normal de los sensores, del emplazamiento y de los procedimientos correctos para leer los instrumentos y verificar las representaciones autográficas.

Todas las configuraciones de error de medición deberán ser objeto de análisis para determinar, por ejemplo, si están relacionadas con la deriva o fallas del instrumento, y se deberán elaborar resúmenes de las deficiencias de datos o informes mensual o anualmente.

### 2.6.4 Funciones generales de los observadores

En general, el SMHN de cada Miembro especificará las obligaciones de los observadores. Dichas obligaciones deberán comprender la ejecución competente de las siguientes funciones:

- a) efectuar observaciones climatológicas con la exactitud requerida empleando los instrumentos adecuados;
- b) efectuar un control de la calidad adecuado;

- c) codificar y enviar observaciones cuando no se disponga de sistemas de codificación y comunicaciones automáticos;
- d) mantener los dispositivos de registro y los registradores de datos electrónicos *in situ*, en particular el cambio de gráficos de registro cuando se proporcionen;
- e) efectuar o recopilar registros semanales o mensuales de datos climatológicos, especialmente cuando no se disponga de sistemas automáticos o estos sean inadecuados, y
- f) proporcionar observaciones complementarias o auxiliares cuando el equipo automático no haga observaciones de todos los elementos necesarios o cuando el equipo esté fuera de servicio.

### 2.6.5 Formación de los observadores

Los observadores deberán recibir formación o acreditación de un servicio meteorológico pertinente con el fin de demostrar su competencia para hacer observaciones conforme a los requisitos establecidos. Deberán ser aptos para interpretar instrucciones relativas al uso de los instrumentos y técnicas manuales que se refieran a sus propios sistemas de observación en concreto. En la *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-Nº 8) se indican los requisitos para la formación de observadores en materia de instrumentos.

A menudo, los observadores son voluntarios o empleados a tiempo parcial, o se ocupan de las observaciones como parte de otras funciones. Tal vez tengan escasa o ninguna formación en climatología o en la realización de observaciones científicas y, por lo tanto, dependen de un buen conjunto de instrucciones. Los cuadernillos de instrucciones para los observadores de estaciones climatológicas y pluviométricas ordinarias deberán elaborarse cuidadosamente y deberán ponerse a disposición de los observadores en todas las estaciones. Las instrucciones deberán ser inequívocas y describir únicamente las tareas pertinentes, limitándose a aquella información que el observador realmente necesita para poder llevar a cabo su labor en forma satisfactoria. Pueden usarse ilustraciones, gráficos y ejemplos a efectos de estimular el interés del observador y facilitar así la comprensión de las tareas que tendrá que realizar cada día. Es aconsejable adjuntar al material de instrucción destinado al observador copias de modelos de páginas de un cuaderno de anotaciones o diario y de un formulario de informe correctamente rellenados. Idealmente, un representante del centro climático debería visitar el emplazamiento, instalar la estación e instruir al observador.

Un observador debe familiarizarse con los instrumentos y deberá ser consciente sobre todo de las fuentes de posibles errores al efectuar la lectura de los mismos. Las instrucciones deberían incluir un texto descriptivo con ilustraciones sencillas que muestren el funcionamiento de cada instrumento. Deberían proporcionarse instrucciones detalladas sobre los métodos que se deben emplear para el cuidado cotidiano, el mantenimiento simple de los instrumentos y las verificaciones de las calibraciones. Si se necesitan tablas de corrección o calibración para tareas concretas de observación y registro, el observador debería familiarizarse plenamente con el uso de las mismas. Las instrucciones también deberían referirse a la utilización práctica de los terminales informáticos empleados para la introducción y transmisión de datos.

Las instrucciones deben referirse tanto a las observaciones visuales como a las instrumentales. Las primeras son particularmente propensas a errores subjetivos y su exactitud depende de la habilidad y experiencia adquirida por el observador. Puesto que es muy difícil comprobar la exactitud o validez de una observación visual individual, debería darse al observador tanto asesoramiento como sea posible para lograr observaciones correctas.

Para complementar el material de instrucción, el personal encargado de la gestión de la estación en el servicio climatológico deberá informar a las estaciones de observación de todos los errores de observación recurrentes o interpretaciones erróneas de las instrucciones. Las visitas de inspección periódicas ofrecen la oportunidad de resolver problemas relacionados con el emplazamiento o los instrumentos y de enriquecer la formación del observador.

Algunos centros climáticos organizan cursos de formación especiales destinados a grupos de observadores voluntarios. Dichos cursos son especialmente útiles para lograr una alta calidad uniforme de las observaciones, como resultado de la formación impartida y la disponibilidad de tiempo para resolver una mayor variedad de problemas que los que encontraría un solo observador al visitar un emplazamiento.

#### 2.6.6 Inspección de las estaciones

Las estaciones climatológicas principales deberán ser inspeccionadas una vez al año. Las estaciones climatológicas ordinarias y las estaciones pluviométricas deberán ser inspeccionadas por lo menos una vez cada tres años, o más frecuentemente si es necesario, para asegurar el mantenimiento y el correcto funcionamiento de los instrumentos y, por consiguiente, la alta calidad de las observaciones. Las estaciones automáticas deberán ser inspeccionadas por lo menos cada seis meses. Las disposiciones especiales relativas a la inspección de instrumentos situados a bordo de barcos se especifican en la *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-N° 8).

Antes de cada inspección, el inspector deberá determinar, en la mayor medida posible, la calidad de la información y de los datos recibidos de cada estación correspondiente a su itinerario. En cada inspección, se deberá comprobar que:

- a) el observador posea una formación actualizada;
- b) el observador siga siendo competente;
- c) la ubicación y la exposición de cada instrumento se conozcan, se registren y sean, hasta ese momento, las mejores posibles;
- d) los instrumentos sean del tipo aprobado, estén en buenas condiciones y se verifiquen con arreglo a las normas pertinentes;
- e) exista uniformidad en los métodos de observación y en los procedimientos para calcular cantidades derivadas a partir de las observaciones;
- f) el libro de anotaciones de la estación esté bien conservado, y
- g) los formularios de registro correspondientes se envíen puntual y regularmente al centro sobre el clima.

Los informes de los inspectores deberían incluir bosquejos, fotografías o diagramas del lugar de observación, indicando los objetos físicos que podrían influir en los valores observados de los elementos climáticos. Los informes también deben indicar cualquier cambio en los instrumentos y cualquier diferencia entre las lecturas de los instrumentos y los patrones portátiles, los cambios en la exposición y en las características del emplazamiento respecto de la visita precedente, y las fechas de las comparaciones y los cambios correspondientes. Los inspectores también deben estar preparados para informar a los observadores de todos los problemas relativos a la transmisión de datos, en particular, los sistemas automáticos de introducción y transmisión de datos. Los informes sobre las inspecciones constituyen una importante fuente de metadatos que sirven para determinar la homogeneidad de un registro climático y deberán conservarse indefinidamente, o la información que contienen deberá transferirse a una base de datos informatizada (véase la sección 3.1).

#### 2.6.7 Mantenimiento de la homogeneidad de los datos

A diferencia de las observaciones cuya única finalidad es ayudar a elaborar predicciones y avisos, un registro climático continuo e ininterrumpido es la base fundamental de muchos



estudios importantes en los que participan una gran variedad de comunidades climáticas. Los conjuntos de datos homogéneos son de vital importancia para responder a las necesidades de la investigación, las aplicaciones y los servicios de usuarios referentes al clima.

Los cambios que pueda experimentar una estación o el cambio de su ubicación son algunas de las principales causas de falta de homogeneidad. Deberán seguirse los diez principios de vigilancia del clima (véase la sección 2.1) cuando sea necesario cambiar la ubicación de una estación climatológica, cuando se vaya a reemplazar una estación por otra alemana o cuando cambien los sistemas de instrumentos. Cuando resulte factible y práctico, tanto las estaciones e instrumentos de observación antiguos como los nuevos deberán seguir funcionando simultáneamente durante un período de por lo menos un año, pero preferentemente de dos años o más, para determinar los efectos de los cambios de instrumentos y de emplazamiento en los datos climatológicos. El emplazamiento antiguo y el nuevo deberán tener un único identificador tanto para la emisión de informes como para el archivado. En el documento *Directrices para la gestión de las modificaciones en los programas de observación del clima* (OMM/DT-N° 1378) se ofrece orientación concreta al respecto.

#### 2.6.8 Verificación de los informes en los centros de recopilación de datos

Los centros de recopilación y archivo de datos habrán de verificar la disponibilidad y calidad de la información en el momento en que esta se reciba de los observadores, y deberán tener funciones adicionales respecto de los datos procedentes de los sistemas automáticos de medición o transmisión. Dado que, normalmente, dichos centros procesan grandes volúmenes de información, el uso de sistemas de verificación informatizados permitiría ahorrar mucho trabajo.

La primera tarea consiste en comprobar si se han recibido las observaciones esperadas y si se han entregado puntualmente. Si dichas observaciones no están disponibles, habrá que comunicarse con el observador para determinar el motivo. En el caso de los sistemas automáticos, los "guardianes" deberán informar lo antes posible de las señales visibles de avería a la autoridad encargada del mantenimiento de los sistemas de observación y transmisión.

Los controles de la calidad de los datos procedentes de emplazamientos dotados de personal o automáticos deberán comprender la información especificada en la sección 2.6.3. Existen otras verificaciones que resultan útiles y que pueden hacerse fácilmente mediante sistemas de vigilancia informatizados. Estos permiten realizar comparaciones con datos de estaciones alemanas, verificaciones estadísticas y comparaciones con los límites preestablecidos y vigilar la constancia temporal y la coherencia mutua entre elementos. En los capítulos 4 y 5 se especifican algunas de las técnicas para la verificación de datos.

Las comprobaciones efectuadas al poco tiempo de haberse realizado las observaciones, ya sea en el emplazamiento o a distancia, son de poca utilidad a menos que se tomen medidas para resolver los problemas rápidamente. Se debe informar al respecto a los observadores, guardianes, inspectores y encargados del mantenimiento o fabricantes de instrumentos o sistemas, y luego la información sobre las medidas adoptadas deberá comunicarse al centro de control. Deberán conservarse copias de todos los informes.

#### 2.6.9 Documentación y metadatos de las estaciones

Las observaciones que carecen de metadatos tienen un uso muy limitado: únicamente se puede aprovechar todo el potencial de las observaciones si también se dispone de suficientes metadatos (datos que describen los datos). Estos metadatos son fundamentales y deberán mantenerse actualizados y ser fácilmente accesibles a través de catálogos de estaciones, inventarios de datos y archivos de datos climáticos. La OMM ha elaborado normas relativas a los metadatos de conformidad con las normas sobre metadatos de la Organización Internacional de Normalización (ISO), especialmente la serie ISO 19100 (véase la *Norma sobre metadatos del Sistema Mundial Integrado de Sistemas de Observación de la OMM* (OMM-N° 1192)). Estas normas son parte del Sistema Mundial Integrado de Sistemas de Observación de la OMM (WIGOS), que aporta un marco para todos los sistemas de observación de la OMM y las contribuciones de la Organización



a los sistemas de observación que copatrocina, en apoyo de todos los programas y actividades de la OMM (véase el *Manual del Sistema Mundial Integrado de Sistemas de Observación de la OMM* (OMM-N° 1160)).

Las observaciones del WIGOS están compuestas por una gama sumamente amplia de datos obtenidos de fuentes que comprenden desde observaciones manuales hasta complejas combinaciones de bandas hiperspectrales de frecuencias para satélites, medidos *in situ* o por control remoto y de una o varias dimensiones; entre estos datos también se encuentran aquellos que han sido procesados. Resulta complejo por naturaleza definir una norma exhaustiva sobre metadatos que abarque todos los tipos de observaciones. Cualquier usuario debe ser capaz de utilizar los metadatos para determinar las condiciones en las que se realizó la observación (o medición) y todos los aspectos que puedan afectar a su empleo o interpretación.

Los metadatos básicos de una estación deberían incluir el nombre y el indicativo (o indicativos) de la estación; las coordenadas geográficas; la elevación sobre el nivel medio del mar; el nombre del gestor o propietario; los tipos de suelo, las constantes físicas y el perfil del suelo; los tipos de vegetación y su estado; una descripción de la topografía local; una descripción del uso de las tierras de los alrededores; fotografías y diagramas de los instrumentos, el emplazamiento y el área circundante; el tipo, el fabricante, el modelo y el número de serie de EMA; el programa de observación de la estación (elementos objeto de medición, hora de referencia, horas a las que se hacen y transmiten las observaciones y mediciones y el plano de referencia de los datos de la presión atmosférica de la estación), y los datos de contacto, tales como el nombre y la dirección postal, la dirección de correo electrónico y los números de teléfono.

La documentación también debería incluir un historial completo de la estación, en el que se indiquen las fechas y los detalles de todos los cambios. Debería abarcar información sobre el establecimiento de la estación, el inicio de las observaciones, cualquier interrupción del funcionamiento y, a la larga, el cierre de la estación. Los comentarios formulados a raíz de las visitas de inspección (véase la sección 2.6.6) son también importantes, especialmente aquellos referentes al emplazamiento, la exposición, la calidad de las observaciones y el funcionamiento de la estación.

Los metadatos sobre los instrumentos deberían indicar el tipo, el fabricante, el modelo y el número de serie del sensor; los principios de funcionamiento; el método de medición y observación; el tipo de sistema de detección; las características de rendimiento; la unidad de medida y los límites de la medición; la resolución, exactitud (incertidumbre), constante de tiempo, resolución de tiempo y duración media de los resultados; el emplazamiento y la exposición (ubicación, cubierta, altura sobre el suelo o nivel de profundidad); la fecha de instalación; la adquisición de datos (intervalo de muestreo, intervalo de cálculo de la media y tipo de promedio); los procedimientos de corrección; los datos de calibración y el tiempo de calibración; el mantenimiento preventivo y correctivo (procedimientos de mantenimiento y calibración recomendados y programados, incluida la frecuencia, y una descripción del procedimiento), y los resultados de las comparaciones con patrones portátiles.

Para cada elemento meteorológico, los metadatos relativos a los procedimientos de proceso de las observaciones deberían incluir el programa de mediciones y observaciones (hora de las observaciones, frecuencia de transmisión y salida de datos); el método, procedimiento y algoritmo del proceso de los datos; las fórmulas de cálculo; el modo de observación y medición; el intervalo de proceso; la resolución transmitida; la fuente de los datos de entrada (instrumento y elemento), y los valores de las constantes y los parámetros.

Los metadatos relativos al tratamiento de datos deberían incluir los procedimientos y algoritmos del control de calidad; las definiciones de los banderines del control de calidad; los valores de constantes y los parámetros, y los procedimientos de proceso y almacenamiento. Los metadatos de interés respecto de la transmisión son el método de transmisión, el formato de los datos, la hora de transmisión y la frecuencia de transmisión.

Las estaciones en altitud requieren metadatos similares a los que necesitan las estaciones en superficie. Además, deben conservar metadatos de cada uno de los instrumentos no recuperables utilizados (tales como las radiosondas).

En la *Norma sobre metadatos del Sistema Mundial Integrado de Sistemas de Observación de la OMM* se ofrecen orientaciones concretas (OMM-Nº 1192) y se refleja la necesidad de indicar la variable observada y responder por qué, dónde y cómo se realizó la observación, además de especificar el modo de proceso de los datos brutos y el nivel de calidad de la observación.

## REFERENCIAS

- Organización Meteorológica Mundial, 1983, 1996, 2008, 2014: *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-Nº 8), quinta, sexta y séptima ediciones. Ginebra.
- , 1994: *Guía de aplicaciones de climatología marina* (OMM-Nº 781). Ginebra.
- , 1994: *Observando el medio ambiente mundial: Tiempo, clima y agua* (OMM-Nº 796) (J.P. Bruce). Ginebra.
- , 1995: *Plan for the Global Climate Observing System (GCOS)* (WMO/TD-No. 681, GCOS-No. 14), version 1.0. Ginebra.
- , 1995: *GCOS Guide to Satellite Instruments for Climate* (WMO/TD-No. 685, GCOS-No.16). Ginebra.
- , 1995: *GCOS Plan for Space-Based Observations* (WMO/TD-No. 684, GCOS-No. 15), versión 1.0. Ginebra.
- , 1997: *Report of the GCOS/GOOS/GTOS Joint Data and Information Management Panel*, tercera reunión (Tokio, Japón, 15 a18 de julio de 1997) (WMO/TD-No. 847, GCOS-No. 39). Ginebra.
- , 1998: *Preliminary Statement of Guidance Regarding How Well Satellite Capabilities Meet WMO User Requirements in Several Application Areas* (WMO/TD-No. 913, SAT-21). Ginebra.
- , 1999: *Representativeness, Data Gaps and Uncertainties in Climate Observations* (ponencia de Chris Folland en el Decimotercer Congreso Meteorológico Mundial, 21 de mayo de 1999) (WMO/TD-No. 977, WCDMP-No. 44). Ginebra.
- , 2000: *SPARC Assessment of Upper Tropospheric and Stratospheric Water Vapour* (WMO/TD-No. 1043, WCCRP-No. 113). Ginebra.
- , 2000: *WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO 2000) – Lightning Detection Systems* (WMO/TD-No. 1028). Ginebra.
- , 2000: *Statement of Guidance Regarding How Well Satellite Capabilities Meet WMO User Requirements in Several Application Areas* (SAT-22, WMO/TD-No. 992). Ginebra.
- , 2002: *Guide to the GCOS Surface and Upper-air Networks: GSN and GUAN* (WMO/TD-No. 1106, GCOS-No. 73), versión 1.1. Ginebra.
- , 2003: *Report of the Capacity-building Training Workshop on Reducing the Impacts of Climate Extremes on Health* (WCASP-No. 59, WMO/TD-No. 1162). Ginebra.
- , 2003: *Guidelines on Climate Observation, Network and Systems* (WMO/TD-No. 1185, WCDMP-No. 52). Ginebra.
- , 2004: *The Changing Atmosphere: An Integrated Global Atmospheric Chemistry Observation Theme for the IGOS Partnership*. GAW Report No. 159 (WMO/TD-No. 1235, ESA SP-1282). Ginebra.
- , 2004: *Guidelines on Climate Data Rescue* (WMO/TD-No. 1210, WCDMP-No. 55). Ginebra.
- , 2004: *Manual sobre la preparación de informes Climat y Climat TEMP* (OMM/DT-Nº 1188). Ginebra.
- , 2004: *Implementation Plan for the Global Climate Observing System for Climate in Support of the UNFCCC* (WMO/TD-No. 1219, GCOS-No. 92). Ginebra.
- , 2006: *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites* (WMO/TD-No. 1250). Ginebra.
- , 2006: *Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate* (WMO/TD-No. 1338, GCOS-No. 107). Ginebra.
- , 2006: *Reglamento Técnico* (OMM-Nº 49), Volumen III: Hidrología. Ginebra.
- , 2007: *Directrices para la gestión de las modificaciones en los programas de observación del clima* (OMM/DT-No. 1378, WCDMP-No. 62). Ginebra.
- , 2008: *Guía de Prácticas Hidrológicas* (OMM-Nº 168), volumen I: Hidrología – De las mediciones a la información hidrológica. Ginebra.
- , 2009: *Guía de Prácticas Hidrológicas* (OMM-Nº 168), volumen II: Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas. Ginebra.
- , 2009: *Guideline for the Generation of Satellite-based Datasets and Products Meeting GCOS Requirements* (GCOS-128, WMO/TD-No. 1488). Ginebra.
- , 2010: *Guía del Sistema Mundial de Observación* (OMM-Nº 488). Ginebra.
- , 2010: *Guide to Agricultural Meteorological Practices* (WMO-No. 134). Ginebra.
- , 2011: *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM-Nº 544), volumen II: Aspectos regionales. Ginebra.
- , 2014: *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM-Nº 8), actualización de 2017. Ginebra.
- , 2015: *Manual del Sistema mundial integrado de sistemas de observación de la OMM* (OMM-Nº 1160). Ginebra.

- , 2015: *Manual del Sistema Mundial de Observación (OMM-N° 544)*, volumen I: Aspectos mundiales. Ginebra.
- , 2016: *Consejo Ejecutivo: Informe final abreviado de la 68ª reunión (OMM-N° 1168)*, Resolución 5 (EC-68) - Competencias para la prestación de servicios climáticos. Ginebra.
- , 2016: *Reglamento Técnico (OMM-N° 49)*, Volumen II: Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional. Ginebra.
- , 2017: *Reglamento Técnico (OMM-N° 49)*, Volumen I: Normas meteorológicas de carácter general y normas recomendadas. Ginebra.
- , 2017: *Norma sobre metadatos del Sistema Mundial Integrado de Sistemas de Observación de la OMM (OMM-N° 1192)*. Ginebra.
- , 2017: *Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción (WMO-No. 485)*. Ginebra.

## LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- Bénichou, P., 1992: "Optimisation de l'implantation d'un réseau complémentaire en zone accidentée: application au réseau automatisé d'Auvergne", en *La Météorologie*, 43-44: 3-17.
- Christian, H., 2003: "Global lightning activity", en *Proceedings of the 12th International Conference on Atmospheric Electricity*, Versailles (Francia), 9 a 11 de junio de 2003 (S. Chauzy y P. Laroche, eds). París, ONERA.
- Cronin, T.M., 1999: *Principles of Paleoclimatology*. Nueva York, Columbia University Press.
- Der Mégréditchian, G., 1985: "Méthodes statistiques d'analyse et d'interpolation spatiales des champs météorologiques", en *La Météorologie*, 17:51-66.
- Dover, J. y L.J. Winans, 2002: "Evaluation of windshields for use in the automated surface observing system (ASOS)", en *Proceedings of the Sixth Symposium on Integrated Observing Systems*, Orlando, Florida, 14 a 17 de enero de 2002. Boston, Sociedad Meteorológica Americana.
- Free, M., I. Durre, E. Aguilar, D. Seidel, T.C. Peterson, R.E. Eskridge, J.K. Luers, D. Parker, M. Gordon, J. Lanzante, S. Klein, J. Christy, S. Schroeder, B. Soden y L.M. McMillin, 2002: "Creating climate reference datasets: CARDS workshop on adjusting radiosonde temperature data for climate monitoring", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83:891-899.
- Free, M. y D.J. Seidel, 2005: "Causes of differing temperature trends in radiosonde upper air datasets", en *Journal of Geophysical Research*, 110:D07101.
- Sistema Mundial de Observación de los Océanos (SMOO), 2000: *Report of the First GOOS Users' Forum (GOOS-No. 92)*. UNESCO, París.
- , 2001: *Principles of the Global Ocean Observing System (GOOS) Capacity Building (GOOS-No. 69)*. UNESCO, París.
- , 2001: *GOOS Capacity Building Implementation Strategy (GOOS-No. 106)*. UNESCO, París.
- Haas, T.C., 1992: "Redesigning continental-scale monitoring networks", en *Atmospheric Environment*, 26A:3323-3333.
- Karl, T.R., C.N. Williams Jr, P.J. Young y W.M. Wendland, 1986: "A model to estimate the time of observation bias associated with monthly mean maximum, minimum, and mean temperature for the United States", en *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25:145-160.
- Leroy, M., 1998: "Meteorological measurements representativity: nearby obstacles influence", en *Tenth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Phoenix, Arizona, 11 a 16 de enero de 1998. Boston, Sociedad Meteorológica Americana.
- , 1998: "Climatological site classification", en *Tenth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Phoenix, Arizona, 11 a 16 de enero de 1998. Boston, Sociedad Meteorológica Americana.
- Lieth, H. (ed.), 1974: *Phenology and Seasonality Modeling*. Nueva York, Springer.
- Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC), 2002: *U.S. Climate Reference Network Site Information Handbook*. Asheville.
- Panel on Climate Change Feedbacks, Climate Research Committee, National Research Council, 2003: *Understanding Climate Change Feedbacks*. Washington, D.C., National Academy Press.
- Panel on Reconciling Temperature Observations, Climate Research Committee, Board on Atmospheric Sciences and Climate, National Research Council, 2000: *Reconciling Observations of Global Temperature Change*. Washington, D.C., National Academy Press.
- , 2000: *Improving Atmospheric Temperature Monitoring Capabilities: Letter Report*. Washington, D.C., National Academy Press.

- Ohring, G., B. Wielicki, R. Spencer, B. Emery y R. Datla, 2005: "Satellite instrument calibration for measuring global climate change: Report of a workshop", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86:1303–1313.
- Oke, T.R., 1987: *Boundary Layer Climates*. Segunda edición. Cambridge, Cambridge University Press.
- , 2006: "Towards better scientific communication in urban climate", en *Theoretical and Applied Climatology*, 84:179–190.
- Quadrelli, R. y J.M. Wallace, 2004: "A simplified linear framework for interpreting patterns of Northern Hemisphere wintertime climate variability", en *Journal of Climate*, 17:3728–3744.
- Santer, B.D., M.F. Wehner, T.M.L. Wigley, R. Sausen, G.A. Meehl, K.E. Taylor, C. Ammann, J. Arblaster, W.M. Washington, J.S. Boyle y W. Bruggemann, 2003: "Contributions of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes", en *Science*, 301(5632):479–483.
- Schwartz, M.D. (ed.), 2003: *Phenology: An Integrative Environmental Science. Tasks for Vegetation Science*, volumen 39. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Seidel, D.J. y M. Free, 2006: "Measurement requirements for climate monitoring of upper air temperature derived from reanalysis data", en *Journal of Climate*, 19:854–871.
- Singleton, F. y E.A. Spackman, 1984: "Climatological network design", en *The Meteorological Magazine*, 113:77–89.
- Sneyers, R., 1973: Sur la densité optimale des réseaux météorologiques. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Serie B, 21:17–24.
- Soden, B.J. y I.M. Held, 2006: "An assessment of climate feedbacks in coupled ocean–atmosphere models", en *Journal of Climate*, 19:3354–3360.
- Thompson, D.W.J. y J.M. Wallace, 2000: "Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability", en *Journal of Climate*, 13:1000–1016.
- Thorne, P.W., D.E. Parker, J.R. Christy y C.A. Mears, 2005: "Uncertainties in climate trends: Lessons from upper air temperature records", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86:1437–1444.
- Thorne, P.W., D.E. Parker, S.F.B. Tett, P.D. Jones, M. McCarthy, H. Coleman y P. Brohan, 2005: "Revisiting radiosonde upper air temperatures from 1958 to 2002", en *Journal of Geophysical Research*, 110 (D18):D18105.
- Unninayar, S. y R.A. Schiffer, 1997: *In-situ Observations for the Global Observing Systems: A Compendium of Requirements and Systems*. Washington, D.C., National Aeronautics and Space Administration Office of Mission to Planet Earth, NP-1997(01)-002-GSFC.
- Wang, J., D.J. Carlson, D.B. Parsons, T.F. Hock, D. Lauritsen, H.L. Cole, K. Beierle y E. Chamberlain, 2003: "Performance of operational radiosonde humidity sensors in direct comparison with a chilled mirror dew-point hygrometer and its climate implication", en *Geophysical Research Letters*, 30:10.1029/2003GL016985.
- Organización Meteorológica Mundial, 2003: *Aerosol Measurement Procedures – Guidelines and Recommendations* (WMO/TD-No. 1178, GAW-No. 153). Ginebra.
- , 2007: *RA IV Training Seminar on Capacity Building in Climate-related Matters* (WMO/TD-No. 1386, WCDMP-No. 63). Ginebra.
- , 2008: *Plant Phenological Guidelines* (WMO/TD-No. 1484, WCDMP-No. 70). Ginebra.
- , 2010: *Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC* (WMO/TD-No. 1523; GCOS-No. 138), actualización de 2010. Ginebra.
- , 2012: *Manual de servicios meteorológicos marinos* (OMM-Nº 558). Volumen I: Aspectos mundiales; Volumen II: Aspectos regionales. Ginebra.
- , 2013: *The GCOS Reference Upper-air Network (GRUAN) – Manual* (Informe técnico N° 2013-02 del WIGOS, GCOS-No. 170). Ginebra.
- , 2017: *Guía del Sistema Mundial Integrado de Sistemas de Observación de la OMM* (OMM-Nº 1165). Ginebra.
- Zhang, H.-M. y L.D. Talley, 1998: "Heat and buoyancy budgets and mixing rates in the upper thermocline, en *Journal of Physical Oceanography*, 28:1961–1978.

## CAPÍTULO 3. GESTIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Durante miles de años, los historiadores han ido registrando información sobre el tiempo. Sin embargo, en el pasado, esta información solía basarse en narraciones de sucesos hechas por otras personas y no se derivaba de las observaciones personales de los historiadores. Es posible que dichas narraciones fueran vagas o resultaran truncadas o afectadas por lapsus de la memoria. Este tipo de información meteorológica se hallaba inserta en una cantidad inmensa de otros tipos de información y buena parte de ella se encuentra en bibliotecas y archivos nacionales. Los archivos meteorológicos especializados a nivel nacional son un fenómeno relativamente reciente, ya que comenzaron a establecerse durante la primera parte del siglo XX.

Los primeros registros manuscritos se anotaban en cuadernos diarios, semanales o mensuales. En ellos, se hacían anotaciones de fenómenos extremos o catastróficos, tales como temperaturas altas o bajas, velocidades anormales del viento, lluvias excesivas o sequías prolongadas, fechas de heladas o congelación, huracanes y tornados. En los cuadernos de bitácora de barcos se registraban las tormentas, los períodos de calma, vientos, corrientes, tipo de nubes y nubosidad. Las fechas de congelación y deshielo de los ríos, lagos y mares, así como también la fecha de la primera y última nevada constituían, a menudo, una parte importante de los libros de registros. El sentimiento de orgullo por el trabajo y el deseo de llevarlo a cabo con éxito siempre han sido rasgos importantes de quienes realizan las observaciones meteorológicas y su registro. La persona encargada de una observación que firma o sella el libro de anotaciones sigue confiriendo autoridad a los registros y sirve para conocer la procedencia de la historia registrada.

Los diarios específicos para recopilar y conservar información climatológica se crearon en los dos o tres últimos siglos. Hasta el decenio de 1940, los formularios elaborados, impresos y utilizados en distintos países solían ser diferentes y, casi siempre, las observaciones se registraban en forma manuscrita. Desde los años cuarenta, y especialmente tras el establecimiento de la OMM, se ha venido haciendo un uso cada vez más frecuente de formularios y procedimientos normalizados, y los archivos meteorológicos nacionales se han convertido en las entidades donde se almacenan estos registros.

Se logró cuantificar los datos climatológicos gracias a la aparición de mejores instrumentos que facilitaron la observación de las variables continuas y discretas y el registro de los valores correspondientes en diarios o libros de anotaciones. Por ejemplo, la introducción de los termómetros permitió efectuar el registro sistemático de las mediciones cuantitativas de la temperatura y los pluviómetros facilitaron las mediciones de la precipitación. Asimismo, el desarrollo de mecanismos de relojería permitió el establecimiento de valores de intensidad y duración y el registro de los mismos. Otros tipos de instrumentos registradores permitieron obtener registros analógicos o autográficos. Con la introducción de cada nueva mejora o adición en las herramientas de observación, se fue incrementando el número de parámetros o variables inscritos en los diarios o cuadernos de anotaciones y se desarrollaron formatos especialmente preparados. Aunque los formatos se hayan modificado, la regularidad y la coherencia, o la continuidad en el mantenimiento de los registros, siempre han sido muy aconsejables. Un buen registro cronológico debería mantenerse al día y seguir un orden secuencial. Las observaciones y los registros hechos en forma metódica y cuidadosa permiten que su recopilación, archivo y uso posterior sean más fáciles.

En la mayoría de los países, los formularios manuscritos se enviaban periódicamente a una entidad central. Hasta el decenio de 1970, estos formularios originales constituían el grueso de todo el contenido de información climatológica que albergaban la mayoría de los centros de recopilación. Puede que esos centros estuvieran en un departamento del gobierno local o nacional o en la oficina central de un sector de la industria como la minería, la agricultura o la aviación. Poco a poco, las actividades de recopilación de datos climatológicos que afectan a la vida nacional se fueron agrupando en un programa concertado de observación y recopilación de datos para servir a los intereses nacionales e internacionales.



Desde finales del siglo XX, la mayoría de la información meteorológica ha venido transmitiéndose en forma digital a los centros nacionales de recopilación de datos centralizados. Como la finalidad primordial de los mensajes ha sido transmitir predicciones meteorológicas para fines operativos, se ha adoptado la práctica común de basarse en los documentos de observación originales para elaborar el registro climático de los centros climáticos del mundo. Sin embargo, las tareas de recogida, transmisión, proceso y almacenamiento de datos meteorológicos con fines operativos están experimentando una mejora asombrosa gracias a la rapidez en el avance de la tecnología informática, y los archivos meteorológicos reciben cada vez más datos que nunca se han registrado en papel. La capacidad y facilidad del uso de las computadoras, la posibilidad de registrar y transmitir información electrónicamente y el desarrollo de mecanismos internacionales para el intercambio de comunicación, como Internet, han proporcionado a los climatólogos nuevas herramientas para mejorar rápidamente su comprensión del clima.

No deberá escatimarse ningún esfuerzo para obtener, en forma digital electrónica, una recopilación completa de todos los datos primarios de observación. La recopilación de datos electrónicamente en la fuente permite aplicar medidas de control rápida y automáticamente, en particular la verificación de errores, antes de transmitir los datos desde el emplazamiento de observación. En muchos casos, la recopilación de datos climáticos por correo tal vez siga siendo una alternativa menos costosa y más fiable, sobre todo en las regiones de menor avance tecnológico, pero, a menos que los datos se hayan registrado en algún tipo de medio electrónico antes de su expedición, habrán de escanearse o digitalizarse en una entidad central. Para gestionar la amplia variedad de datos recopilados con fines meteorológicos y climatológicos, se requiere aplicar un método sistemático que abarque registros en papel, registros en microfilm y registros digitales. En el documento *Climate Data Management System Specifications* (WMO-No. 1131) se aportan el marco y las especificaciones para la aplicación de un enfoque sistemático.

En el presente capítulo se examinan conceptos y consideraciones generales para la gestión de datos climáticos. En las referencias que figuran en la última sección del presente capítulo puede consultarse información detallada y orientación en relación con cuestiones específicas, como las necesidades del Sistema de Gestión de Datos Climáticos (CDMS).

### 3.2 IMPORTANCIA Y FINALIDAD DE LA GESTIÓN DE DATOS

El objetivo fundamental de la gestión de los datos climáticos consiste en conservar, captar y proporcionar datos y productos climáticos para que las instancias planificadoras y decisorias y los investigadores los utilicen. El archivo permanente es un objetivo importante. El sistema de gestión de datos de un archivo climático debe suministrar la información para describir el clima del ámbito para el que se haya establecido el archivo, ya sea nacional, regional o mundial. Los datos que generan las redes meteorológicas y climatológicas, así como diversos proyectos de investigación, representan unos recursos valiosos y, a menudo, extraordinarios, adquiridos mediante una inversión sustancial de tiempo, dinero y esfuerzo. Muchos de los usos que acaban por darse a los datos climáticos no pueden preverse cuando los programas de adquisición de datos están en fase de planificación y, con frecuencia, surgen nuevas aplicaciones para los mismos, mucho después de haber adquirido la información. La utilización inicial de datos meteorológicos y afines suele ser la primera de muchas aplicaciones futuras. El análisis posterior de los datos con muchas y diversas finalidades permite aumentar notable y constantemente el rédito de la inversión inicial en los programas de adquisición de datos. Por ejemplo, el desafío que plantea el cambio climático mundial está incrementando las necesidades de datos climáticos y sistemas de gestión de datos en una proporción mucho mayor a la prevista cuando se establecieron las primeras redes. Con el fin de responder a estas necesidades, es sumamente importante que tanto la información climática actual como la histórica sean gestionadas de manera sistemática y exhaustiva. A los datos meteorológicos convencionales se suman hoy en día los datos obtenidos de una amplia gama de instrumentos y sistemas, tales como los satélites, sistemas de radar y otros dispositivos de teledetección, y datos derivados de modelos, lo que convierte a los sistemas eficaces y exhaustivos de gestión de datos climáticos en un recurso indispensable para los centros climáticos modernos.



Los datos climatológicos resultan más útiles cuando se han editado, sometido a un control de calidad y almacenado en un archivo nacional o centro climático y se ponen a disposición en formularios sencillos. Si bien se están produciendo innovaciones tecnológicas a un ritmo acelerado, muchos de los registros que poseen los SMHN siguen sin tener un formato digital. Estos registros deben ser gestionados junto con la cantidad cada vez mayor de registros digitales. Un CDMS es un sistema informatizado integrado que facilita el archivo, la gestión, el análisis, el suministro y el aprovechamiento eficaces de una amplia gama de datos climáticos integrados.

Los principales objetivos de la gestión de bases de datos consisten en mantener permanentemente la integridad de la base de datos y garantizar que esta contenga todos los datos y metadatos necesarios para responder a las necesidades por cuyo motivo fue establecida, tanto en el presente como en el futuro. Los sistemas de gestión de las bases de datos han revolucionado la gestión de datos climáticos, ya que permiten realizar de manera eficiente el almacenamiento, la transformación y la actualización de muchos tipos de datos y el acceso a los mismos, y mejorar la seguridad de los datos.

Es esencial que, tanto en el desarrollo de bases de datos climáticos como en la aplicación de prácticas de gestión de datos, se tengan en cuenta las necesidades y las capacidades de los usuarios de datos, tanto actuales como futuros. Aunque parezca que ello pueda intuirse, hay situaciones en que se omite información importante para una aplicación útil, o los centros de datos no dedican suficientes recursos a la comprobación de la calidad de los datos, que, dadas las exigencias explícitas o implícitas de los usuarios, debe ser alta. Por ejemplo, una base de datos que carezca de claves meteorológicas, tanto presentes como pasadas, puede llevar a subestimar la predominancia del fenómeno observado. En todos los proyectos nuevos, los gestores de datos deberán tratar de incorporar en su equipo de proyecto al menos a un usuario de datos representativo, o bien entablar una serie de consultas periódicas con usuarios interesados para estar al corriente de los cambios en las necesidades y de los problemas que afectan a las comunidades de usuarios. Entre las comunidades de interesados cabe citar como ejemplo las que se dedican a la predicción climática, el cambio climático, la agricultura, la salud pública, la gestión de desastres y situaciones de emergencia, la energía, la gestión de recursos naturales, la planificación urbana, las finanzas y las aseguradoras.

### 3.2.1 **Diseño de un sistema de gestión de datos climáticos**

Todos los sistemas de gestión de datos climáticos se basan en algún modelo previo de los datos. El diseño de este modelo es muy importante a efectos de la calidad del sistema resultante (véase la figura 3.1). Un modelo inadecuado dificultaría el desarrollo y mantenimiento del sistema. Por lo general, una base de datos diseñada para obtener datos meteorológicos vigentes permitirá recuperar rápidamente los datos recientes de un gran número de estaciones. En cambio, muchas aplicaciones de datos climáticos recuperan datos de una o varias estaciones durante un largo período. Es esencial documentar todo el diseño y el modelo de datos previo del Sistema de Gestión de Datos Climáticos (CDMS) para facilitar a los programadores informáticos su futura ampliación o modificación. Algo semejante puede decirse respecto de un modelo de metadatos. Puede consultarse información detallada acerca de los modelos de datos en la publicación *Directrices sobre la gestión de datos climáticos* (OMM/DT-N° 1376), Modelos de datos utilizados por los CDMS, págs. 28 y 29, y en *Climate Data Management System Specifications* (WMO-No. 1131), 4.2.3 y 4.3.

El componente “datos climáticos” se refiere a una gran variedad de datos climáticos relativos a las series temporales. Su alcance es mucho mayor de lo que suele entenderse por observaciones meteorológicas tradicionales, e incluye los siguientes elementos:

- a) variables climáticas esenciales del Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC);
- b) una visión más amplia de los metadatos climáticos que incluye metadatos sobre observaciones y sobre la procedencia de los datos de descubrimiento;
- c) productos estándar de la OMM;

- d) productos obtenidos mediante observación y datos reticulados;
- e) resultados de los modelos numéricos;
- f) una gama de datos auxiliares utilizados en apoyo a los CDMS, como datos espaciales y datos sobre el impacto, documentación y programas informáticos sobre el clima;
- g) otros datos importantes como modelos lógicos de datos.

El componente “gobernanza de los CDMS” se refiere a un conjunto coherente de políticas y procesos de gestión que aportan una base sólida para el establecimiento y la gestión de fuentes autorizadas de datos climáticos y servicios conexos. Aunque, mediante una serie de iniciativas de la OMM se establecerán políticas coherentes a su debido tiempo, este componente puede contribuir a mejorar de forma inmediata muchas prácticas de gestión de datos de los SMHN y engloba los siguientes conceptos:

- a) una política de datos, incluidos los compromisos institucionales, que garantice la sostenibilidad de los CDMS, y la propiedad intelectual;
- b) la entrega de datos;
- c) datos de terceros;
- d) una política climatológica;
- e) la gestión, incluida la gestión de los datos y de la tecnología de la información.

El componente “gestión de datos” se refiere a la funcionalidad necesaria para gestionar de manera efectiva los datos climáticos y abarca los siguientes conceptos:

- a) la captación y extracción de datos;
- b) el rescate de datos;



**Figura 3.1** Representación gráfica de los principales componentes funcionales de un Sistema de gestión de datos climáticos.

- c) el control de calidad de las observaciones;
- d) la evaluación de la calidad;
- e) la gestión de metadatos climáticos.

El componente “suministro de datos” se refiere a la funcionalidad necesaria para suministrar datos climáticos y abarca los siguientes conceptos:

- a) la localización de datos (tanto datos como metadatos climáticos);
- b) el suministro de datos en formatos definidos por la OMM;
- c) el suministro de datos basado en normas espaciales abiertas como las del Open Geospatial Consortium (OGC) y la serie de normas ISO 19100 de la Organización Internacional de Normalización.

El componente “análisis de datos” abarca una amplia variedad de técnicas de análisis que se aplican a los datos climáticos y que pueden dar lugar a una gama de productos de datos derivados, por ejemplo:

- a) una serie de técnicas que incluyen el análisis estadístico, espacial y de imágenes;
- b) la homogeneización;
- c) procesos de modelización numérica.

El componente “presentación de los datos” representa un conjunto de técnicas diversas utilizadas para comunicar información relacionada con el clima. Estas incluyen:

- a) informes escritos;
- b) la exploración de datos climáticos relativos a las series temporales mediante una interfaz gráfica de usuario con funcionalidades como la generación de una amplia variedad de informes de inteligencia institucional, que incluyan tablas, gráficos, diagramas de dispersión, histogramas y conjuntos; la visualización de datos dispares utilizando, por ejemplo, técnicas cartográficas, diagramas y representaciones en 3D; y la realización de una búsqueda integrada y una exploración dinámica de datos y metadatos climáticos dispares utilizando funcionalidades como técnicas de inteligencia espacial;
- c) la exploración multimedia de los datos mediante, por ejemplo, podcasts, vídeos o fotografías.

El componente “infraestructura de la tecnología de la información” representa las funcionalidades necesarias para mantener un CDMS.

Los componentes son conceptos abstractos. Un único componente puede referirse a diversos programas informáticos y procesos que cumplen un requisito funcional. Asimismo, una única aplicación informática puede aportar las funcionalidades descritas en varios componentes. La funcionalidad básica de los CDMS es la misma para los países menos adelantados, en desarrollo o desarrollados. No todos los componentes son necesarios; en la publicación *Climate Data Management System Specifications* (WMO-No. 1131) se indica si una funcionalidad se considera necesaria, recomendada u opcional, y se aportan explicaciones detalladas para todos los componentes.

### 3.2.2 Adquisición de datos en el CDMS

Los datos que ya están en formato digital están preparados para introducirse directamente en el sistema. Los registros en formato no digital generalmente se digitalizan durante el proceso

de ingreso. Un objetivo fundamental del proceso de ingreso de datos consiste en duplicar, con el mínimo de errores, los datos brutos tal como fueron registrados en el proceso de captación. Un sistema de ingreso mediante teclado debería ser eficiente y fácil de utilizar por un operador de ingreso de datos. El diseño del sistema también puede hacerse de tal manera que permita validar los datos a medida que se introduzcan y detectar errores probables. También es posible establecer valores por defecto correspondientes a algunos elementos para evitar pulsar el teclado innecesariamente.

Cuando haya estaciones meteorológicas automáticas (EMA) en servicio, los datos climáticos, incluidos todos los mensajes de control de errores, deberán transmitirse electrónicamente al CDMS. Los datos observados manualmente deberán transmitirse al CDMS lo antes posible mediante el medio más práctico. Conviene recopilar datos al menos diariamente porque probablemente ello permita mejorar la calidad de los datos y disminuir el trabajo manual dedicado al control de calidad, se detectarán más rápidamente los errores técnicos y habrá mayores oportunidades de acceder a un mayor número de datos. No obstante, la entrega de datos mensual es una alternativa posible cuando no pueda efectuarse la transmisión diaria. Por ejemplo, en Australia muchos de los alrededor de 6 000 observadores voluntarios continúan suministrando informes mensuales sobre la precipitación en los que figuran las observaciones diarias correspondientes al mes en cuestión.

Puesto que muchas observaciones meteorológicas son registradas por instituciones u organizaciones distintas de los SMHN, la adquisición de datos en su forma original puede resultar difícil. En esos casos, debería hacerse lo posible por obtener copias de los formularios de registro originales. Si fuera imposible obtener los originales o una copia del registro, debería incluirse una nota al respecto en el inventario de la documentación del centro para indicar información referente a la existencia y localización de los datos, el volumen disponible, la duración del período de registro, las estaciones que configuran la red según corresponda y los elementos observados.

Aunque no sea un requisito formal, es recomendable que el CDMS también contenga información sobre noticias o imágenes periodísticas y otra información similar además de los datos y metadatos tradicionales. Para incluir este tipo de información podría recurrirse a obtener una imagen del informe impreso con una cámara digital o un escáner; definir la fecha, la región y el tipo de fenómeno (por ejemplo, crecida, sequía o precipitación intensa); indicar el nombre del medio de comunicación, e introducir comentarios adicionales acerca del fenómeno.

Es importante conservar tanto los valores de los datos recibidos inicialmente como el valor sometido al control de la calidad en la fecha más reciente. El valor original probablemente se someterá a un primer proceso de control de calidad automático al introducirse en la base de datos y, de ser necesario, a un proceso de control de calidad más exhaustivo. Aunque no supere ninguno de estos controles, habrá de conservarse. Algunos CDMS conservan, además de los valores originales y finales, todas las modificaciones realizadas.

Otro aspecto de la adquisición de datos consiste en el registro de casos en que se esperaban datos, pero no se recibieron. La pérdida de datos puede ocurrir a consecuencia de una interrupción en el funcionamiento de los instrumentos, errores en la transmisión de datos y errores en el proceso de su adquisición. Los datos faltantes pueden reconstruirse con diversos grados de certidumbre. Por ejemplo, puede concluirse que el valor de una medición de precipitación no recibida sea cero cuando se sabe a través de otros datos que las condiciones locales y sinópticas hacen excluir la posibilidad de que se produjera una precipitación. En otros casos, es posible estimar el valor de los datos con un grado de certidumbre razonable utilizando las técnicas especificadas en la sección 5.9. En todos los casos, en la documentación de los conjuntos de datos se debe indicar debidamente los datos reconstruidos o estimados (véase la sección 3.4.1).

### 3.2.3 Documentación de datos del CDMS

Es necesario disponer de un conjunto suficiente de metadatos para informar a los usuarios futuros del tipo de datos que contiene el sistema, la manera en la que se recopilaron los diversos

conjuntos de datos y cualquier problema inherente. Es recomendable que en la gestión de las bases de datos se incluya toda la información que pueda afectar a la homogeneidad de un conjunto o una serie de datos, incluidos los factores indicados en la sección 2.6.9.

Por lo general, en un sistema ideal, la estructura de los metadatos es más compleja que los propios datos. Por ejemplo, una observación de la cantidad de lluvia indica fundamentalmente la cantidad de precipitación registrada durante cierto período de tiempo en una determinada estación. Los metadatos conexos que pueden aplicarse a esta observación, y que pueden ser necesarios para interpretar cabalmente los datos, pueden incluir información tal como la fecha de referencia utilizada por la base de datos (por ejemplo, el huso horario); los indicadores o banderines de calidad que se han atribuido a la observación; el historial de las modificaciones introducidas en los valores y en cualquier banderín conexo; el instrumento utilizado para registrar la observación, junto con una indicación detallada sobre los programas de mantenimiento, las tolerancias, los parámetros internos e información similar; el nombre y los datos de contacto del observador; los pormenores de la ubicación y el emplazamiento de la estación y el historial de esta; el programa de observaciones en vigor en ese momento y su historial, y los datos sobre la topografía y la cubierta del suelo del emplazamiento. En el documento *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WMO/TD-No. 1186), secciones 2.1 a 2.5, se examinan detalladamente los metadatos referentes a una estación. De modo parecido, los metadatos referentes a un conjunto de datos reticulados de observaciones satelitales de exposición solar de alta resolución deberían incluir la extensión geográfica correspondiente a las observaciones, el período de registro del conjunto de datos, un historial de las revisiones y el mantenimiento de que ha sido objeto el conjunto de datos, los satélites que suministraron los datos, las funciones de transferencia y los procedimientos de promediación para obtener valores reticulares, la exactitud de la posición satelital, información sobre la exactitud de los datos y la información de contacto.

Los metadatos también son necesarios para el propio CDMS. Debería hacerse una explicación completa de cada proceso que tiene lugar en el sistema (por ejemplo, la introducción de datos mediante teclado o el control de calidad). Debería documentarse y conservarse un historial de todo cambio que se introduzca en cualquier parte del sistema (por ejemplo, programas informáticos, el equipo físico o procedimientos manuales). Dado que las prácticas de observación, las técnicas de control de calidad y los procedimientos de tratamiento de datos cambian con el transcurso del tiempo, estos metadatos son indispensables para el análisis climatológico de los datos históricos. Los analistas usan los metadatos para determinar y comprender la manera en que fue observado y procesado el valor de un dato con el fin de establecer una distinción entre las influencias meteorológicas y las posibles influencias no meteorológicas en el registro de datos.

Otra categoría de metadatos consiste en el registro de los datos que posee el CDMS. Deberían hacerse habitualmente inventarios de los datos que conserva el CDMS. La estratificación podría efectuarse, por ejemplo, según el elemento de datos, la ubicación de la estación o la hora. Deberían hacerse y conservarse listas de los contenidos para describir y definir el contenido de datos de los distintos archivos y para proporcionar información sobre las claves y las prácticas de observación empleadas. El conocimiento del contenido del CDMS es importante para poder extraer información del sistema de manera eficiente. Debería utilizarse el perfil básico de la OMM de la serie de normas ISO 19100 sobre datos y metadatos, salvo que sea reemplazado por la publicación de normas de metadatos climáticos.

### 3.2.4 Almacenamiento de datos del CDMS

Una tarea importante del gestor de datos consiste en estimar las necesidades de almacenamiento de datos, sobre todo en qué medida aumentarán en el futuro. Habrá que tener en cuenta la información adicional que se incluirá en los registros de datos (por ejemplo, banderines de control de la calidad, mensajes originales, y la fecha y hora de actualización del registro), las necesidades de metadatos y las redundancias necesarias para poder reestablecer las bases de datos. Algunos tipos de datos, tales como los obtenidos por teledetección, los oceanográficos y los de las EMA con alta resolución temporal, requieren mucho espacio de almacenamiento.

Es posible que las necesidades de almacenamiento de los datos no convencionales (como la humedad del suelo, las observaciones fenológicas y los índices de vegetación) difieran de las relativas a las observaciones más tradicionales. Las EMA generarán frecuentemente datos de interés desde el punto de vista de la calidad de la observación, pero que no son en sí mismos datos climáticos (por ejemplo, la información sobre la tensión de la batería de una EMA). Por regla general, esta información debería utilizarse antes de archivar los datos; si la información no se incorpora al CDMS, debería conservarse permanentemente en otro lugar y permitir que los gestores tengan acceso a ella. A menudo, el proceso de control de calidad da lugar a valores e información que pueden diferir de los datos originales, por lo que resulta necesario almacenar tanto los datos originales como todos los datos diferentes que genere el proceso de control de calidad.

Estimar el aumento de las necesidades futuras es una ardua tarea, ya que es difícil prever qué tipos de datos estarán disponibles a medida que transcurra el tiempo y avance la tecnología. El gestor de datos debe tener en cuenta todos estos factores cuando determine las necesidades de almacenamiento.

Los registros en formato no digital deberían almacenarse de tal manera que se minimice su deterioro. Por lo tanto, deberían almacenarse en un ambiente controlado para evitar temperaturas y humedad extremas, insectos, plagas, incendios, inundaciones, accidentes o su destrucción deliberada. Un ejemplo ideal sería el almacenamiento en cajas libres de ácido, en depósitos seguros y con aire acondicionado. Debería establecerse un programa de mantenimiento para salvar los documentos que están sufriendo un deterioro y especialmente los datos que estos contienen.

Puesto que cada vez se produce y conserva una mayor cantidad de información, se plantea la disyuntiva entre si se debe o no continuar almacenando todos los registros en su forma manuscrita original. Muy a menudo, los registros climatológicos se archivan en sótanos, cobertizos y en otras instalaciones muy poco apropiadas. Frecuentemente se encuentran sin catalogar y pueden ser inaccesibles y estar en una condición que induce al deterioro. Como medio para reducir los costos del papel, optimizar el uso del espacio y proporcionar seguridad a los documentos originales, se recomienda que estos datos manuscritos se escaneen para transferirlos a un archivo digital y se conserven cuidadosamente. Las especificaciones técnicas del equipo informático necesario para el almacenamiento y la recuperación de documentos dependen de las necesidades de datos y de las limitaciones de los recursos financieros, así como de los adelantos tecnológicos, por lo que no existen normas mundiales ni una manera exclusiva de almacenamiento preferida. Cabe recordar que ninguna forma de almacenamiento es permanente y, por lo tanto, deberá efectuarse un examen periódico del método de archivo. Deben efectuarse copias de reserva de los archivos informáticos de manera segura y regular y al menos una copia de los mismos deberá almacenarse en un lugar que no sea el archivo principal.

El microfilm está formado por imágenes de documentos reducidas fotográficamente a una fracción muy pequeña de su tamaño original. Hay varios formatos de microfilm, por ejemplo, pequeños carretes de película, microfichas, sobres plásticos, folios de película, tarjetas con abertura, cartuchos y casetes. Sin embargo, los importantes adelantos en las capacidades de almacenamiento digital hacen que, hoy en día, sea preferible que los documentos en papel se escaneen directamente o se fotografíen digitalmente en un sistema informático junto con imágenes de microfilm reemplazadas. Este proceso facilita el acceso a los datos y garantiza su conservación para las generaciones futuras.

### 3.2.5 **Consulta y recuperación de datos del CDMS**

Un aspecto importante de los CDMS es la capacidad de los medios para la recuperación y el análisis de los datos. Se debería proporcionar a la gran mayoría de los usuarios interfaces gráficas para la recuperación de datos, y las líneas de instrucción deberían estar a disposición de un pequeño número de usuarios expertos que necesiten hacer recuperaciones inhabituales. Los usuarios deberían ser capaces de especificar sus propios criterios de recuperación, y la documentación del sistema debería ser clara y proporcionar toda la información necesaria para ayudar a los usuarios.



Las opciones de entrega de datos deberían ser amplias e incluir medios para especificar detalles concretos sobre las estaciones, las horas y el tipo de presentación de los resultados. Los usuarios deberían poder acceder a listas de datos, resúmenes tabulares, análisis estadísticos y presentaciones gráficas.

### 3.2.6 Archivos del CDMS

Un archivo es un medio para conservar a largo plazo, y en algunos casos de forma permanente, los datos y metadatos del CDMS. La estructura que tendrá el archivo, ya sea simple o compleja, física o electrónica, se determinará en función de los recursos financieros disponibles, el nivel de formación del personal dedicado al archivo, el volumen de datos que deberá archivarse, la forma en que se presentan los datos (tales como documentos de papel o formato digital), la facilidad para introducir información en el archivo y recuperarla, la facilidad con que los usuarios pueden consultar la información, la facilidad para mantener el archivo y la facilidad para ampliarla a medida que aumente el volumen de los datos archivados. Deberán archivarse todos los elementos del CDMS, que abarcan no solo valores de datos, sino también catálogos, inventarios, historiales, diccionarios e información similar.

### 3.2.7 Seguridad del CDMS

El objetivo principal de una política de seguridad y de las actividades que esta abarca consiste en evitar la pérdida o el deterioro del CDMS. Para ello, se han de cumplir los siguientes requisitos:

- a) todo el personal deberá conocer sus responsabilidades profesionales;
- b) los archivos y el entorno de la base de datos deben ser seguros y estar protegidos de riesgos materiales, como incendios y el exceso de humedad;
- c) en relación con los datos digitales, los usuarios deberán respetar las normas de seguridad relativas a la base de datos y sus componentes. Solo un número reducido de personas registradas tendrá derecho a realizar manipulaciones de datos tales como su introducción, actualización o eliminación;
- d) el personal autorizado para manipular una base de datos debe comprometerse a no efectuar ninguna operación aparte de las operaciones y prácticas aprobadas por el gestor de datos;
- e) cualquier modificación que se introduzca en las tablas de datos debe constar en una pista de auditoría, y se debe controlar el acceso a esta pista;
- f) deberán aplicarse principios relativos a la seguridad de las contraseñas, como los que suponen no desvelarlas ni anotarlas en un papel, cambiarlas regularmente y usar contraseñas muy seguras compuestas por letras, números y caracteres aparentemente no relacionados;
- g) deberán desactivarse todos los servicios innecesarios que estén presentes en el ordenador de la base de datos;
- h) la base de datos deberá estar protegida contra virus y ataques de piratas informáticos;
- i) deberán hacerse copias de seguridad periódicas, puesto que es probable que el trabajo realizado con posterioridad a la copia de seguridad más reciente se pierda y sea necesario repetirlo si se produce un fallo informático. Por lo general, debería hacerse una copia de seguridad acumulativa diaria y una copia completa semanal;
- j) de vez en cuando, por lo general, una vez al mes, deberá guardarse una copia de seguridad completa de las tablas de datos en un lugar seguro, protegido contra incendios y distante



de la ubicación física de la base de datos climáticos. Es una práctica común conservar tres copias del mismo archivo en diferentes lugares seguros y, de ser posible, en diferentes ciudades, y

- k) deberán hacerse copias de seguridad del CDMS antes de introducir cualquier cambio en el programa o en el diseño del sistema, o en las aplicaciones que contenga el CDMS.

### 3.2.8 **Gestión del CDMS**

Se deberá hacer un seguimiento habitual del CDMS para determinar la calidad del funcionamiento de los procesos que utilizan y sustentan la base de datos. Como ejemplos de los procesos que sustentan los datos cabe citar el mantenimiento de metadatos, la asimilación de datos, las prácticas de control de calidad que modifican la base de datos y la recuperación de información. Cada proceso deberá ser objeto de seguimiento, evaluación y, si es necesario, mejora. Se recomienda encarecidamente que los gestores de datos conciban la gestión de datos como una prestación de extremo a extremo en la que se informa a los gestores de observaciones acerca de los problemas sistemáticos en la calidad de los datos, la pérdida de datos y otras prácticas perjudiciales para el registro climático con el fin de remediarlos.

Por lo general, los informes de seguimiento incluirán el número y tipo de estaciones que figuran en la base de datos, el volumen de datos contenido en la base de datos, agrupados por estaciones y por tipos de elementos observados, e información sobre los datos que faltan. Esta información puede compararse con las horas de observación previstas a fin de determinar cuándo y dónde se están perdiendo los datos. Otros tipos de informe pueden referirse a las prácticas de control de calidad para garantizar que dichos controles se están llevando a cabo debidamente respecto de los nuevos datos o para determinar grupos de datos que presentan demasiados problemas de calidad. Es útil realizar un seguimiento de la cantidad y el tipo de datos que consultan los usuarios, ya que ello ayuda a determinar los conjuntos de datos más importantes y las áreas que convendría desarrollar en el futuro.

La frecuencia de los informes de seguimiento y el período que abarquen dependerán de las necesidades del SMHN. Los informes sobre la asimilación de datos pueden hacerse automáticamente, tal vez cada día. Los informes mensuales sobre la cantidad y la calidad de los datos suelen coincidir con el ciclo mensual de muchos productos climáticos.

### 3.2.9 **Normas y directrices aplicables a los CDMS a nivel internacional**

No se ha establecido una estructura óptima para las bases de datos climatológicas, ya que el diseño depende de las necesidades específicas de los SMHN y de las partes interesadas. Puede que en algunos casos se necesite acceder a todos los datos relativos a un elemento concreto en el conjunto de una región y durante un período de tiempo determinado, mientras que, en otros casos, se requiera consultar una serie cronológica de datos sobre el mismo elemento respecto de un solo lugar. Las necesidades particulares influirán notablemente en el espacio de almacenamiento necesario o el tiempo de respuesta para cargar los datos o acceder a los mismos. Sin embargo, los principios generales que deberían seguirse para cualquier diseño son:

- a) documentación para el usuario: los manuales deberían proporcionar una descripción general de la base de datos e instrucciones para su instalación, e incluir información detallada para los usuarios, los administradores del sistema y los programadores;
- b) introducción de datos mediante teclado: la presentación en pantalla de los formularios de introducción de datos debería ser semejante a la de los formularios en papel cuyos datos se están copiando; la adaptación de la presentación debería ser posible; los procedimientos para introducir información en la base de datos deberían satisfacer las necesidades del SMHN; la validación de las entradas (por ejemplo, valores permisibles o identificadores de estación) debería hacerse automáticamente en el proceso de introducción de datos mediante teclado, y los valores por defecto deberían introducirse automáticamente;

- c) asimilación de datos digitales: el sistema debería poder asimilar automáticamente datos en formato normalizado que se transmiten por medio del Sistema Mundial de Telecomunicación (SMT), archivos que contengan datos relativos a múltiples estaciones, varios archivos que contengan datos relativos a una sola estación, datos procedentes de las EMA, datos con formatos definidos por el usuario y metadatos;
- d) validación y control de calidad: el sistema debería proporcionar banderines que indiquen la fuente de los datos, el grado de aseguramiento de la calidad efectuado (como el proceso de introducción de datos mediante teclado o el proceso de fin de mes), resultados del aseguramiento de la calidad y el motivo de la decisión de aceptar, rechazar o estimar un valor. Debería conservar los valores de los datos originales, estimados y modificados; también debería evaluar datos de forma temporal y espacial para verificar los valores permisibles, la coherencia meteorológica y la verosimilitud física;
- e) documentación técnica: debe haber listados que definan cada tabla de la base de datos y las relaciones entre las tablas; las prácticas de denominación deberían ser coherentes en todas las tablas, índices, entidades y vistas;
- f) acceso a los datos: la interfaz entre el usuario y la base de datos debería ser fácil de utilizar y los procedimientos para extraer información deberían estar documentados con instrucciones claras y ejemplos;
- g) metadatos: el sistema debe ser capaz de gestionar toda la gama de metadatos (conforme a lo descrito en la sección 2.6.9);
- h) información de salida: los CDMS deberían ser capaces de producir información de salida normalizada que responda a las necesidades del SMHN, como listados de datos y tabulaciones de datos horarios, diarios, mensuales y de períodos de más larga duración; resúmenes estadísticos, y representaciones gráficas tales como el análisis de las isohipsas, rosas de los vientos, series temporales, sondeos en altitud y modelos de transcripción de las estaciones;
- i) gestión de datos y del sistema: debería ser posible hacer copias de seguridad del sistema regularmente y cuando así se solicite, sin necesidad de apagarlo; reestablecer su funcionamiento según convenga de forma oportuna; registrar transacciones individuales; mantener la seguridad; hacer un seguimiento de su rendimiento (por ejemplo, utilización de memoria, disponibilidad de espacio de almacenamiento, número de transacciones y estado de los registros del sistema), y copiarlo a intervalos periódicos en un lugar físico diferente;
- j) nivel de asistencia: los usuarios deberían ser capaces de resolver problemas utilizando la documentación disponible, interactuar con otros usuarios para intercambiar preguntas y comentarios, y recibir asesoramiento de los creadores del sistema cuando sea necesario y de manera oportuna;
- k) flexibilidad: debería ser posible ampliar y modificar el sistema a medida que evolucionen las tecnologías de los equipos y los programas informáticos y cambien las fuentes de datos, y a medida que aumentan las necesidades de la información de salida.

### 3.3 CONTROL DE CALIDAD

El objetivo del control de calidad consiste en verificar si el valor de un dato notificado es representativo de la medición que se pretendía efectuar y no se ha visto afectado por factores no relacionados con el mismo. Por lo tanto, es importante comprender desde un principio lo que supuestamente deben representar las lecturas de una determinada serie de datos. Los datos no deberían ser considerados aptos para su archivo permanente hasta que no hayan sido sometidos a un control de calidad de un nivel adecuado.

El observador o el sistema de observación automática deberían aplicar medidas de control de calidad para garantizar que la hora y la identificación de la estación sean correctas, que los valores registrados reflejen fielmente las condiciones reinantes y que existe una coherencia entre los elementos observados. Todos estos pasos deberían darse antes de registrar o transmitir una observación.

El centro de archivo también deberá someter las observaciones recibidas a un control de calidad. Si el documento de partida consiste en registros manuscritos, miembros del personal debidamente capacitados deberían examinarlos exhaustivamente una vez que lleguen al centro de archivo antes de transferirlos a un formato digital. Los formularios deberían examinarse para garantizar su debida identificación (por ejemplo, nombre de la estación, número de identificación y ubicación), legibilidad y anotación adecuada de los datos (por ejemplo, con la precisión correcta y en las columnas correspondientes). Si se detecta algún problema, debería notificarse a la estación de observación para aclarar la situación o corregir los problemas. Si los recursos no permiten realizar el control de calidad de todos los datos, debería darse prioridad a los elementos climáticos más importantes.

Los procedimientos de control de calidad de los datos meteorológicos contribuyen a garantizar niveles definidos de calidad a lo largo del ciclo de vida de los datos meteorológicos y deben ser parte integrante del sistema de gestión de la calidad de una entidad. Cabe señalar que los procedimientos sirven, en particular, para asegurar los niveles de calidad necesarios para prestar apoyo a las aplicaciones y los servicios climáticos. Asimismo, cabe indicar que es necesario que los procedimientos se adapten a las condiciones climáticas concretas de cada país, y que se ajusten a la infraestructura de observación y de tecnología de la información existente o prevista, así como a los recursos humanos disponibles. Los procedimientos de control de calidad aplicados deben documentarse adecuadamente y estar a disposición de los usuarios de los datos. En una versión actualizada que sustituirá al documento *Guidelines on the Quality Control of Surface Climatological Data* (WMO/TD-No. 111), se aportarán orientaciones detalladas para el aseguramiento de la calidad de los datos de observación en superficie para aplicaciones climáticas. La nueva publicación incluirá varias pruebas que ampliarán la información que figura en las secciones 3.4.3 a 3.4.7.

### 3.3.1 Procedimientos de control de calidad

Cuando los datos observados estén disponibles en formato digital, el centro de archivo debería someterlos de manera periódica y sistemática a un control de calidad exhaustivo y detallado. Los programas informáticos pueden examinar todos los datos disponibles e indicar los que no hayan superado las pruebas preestablecidas, pero no son tan indicados para determinar el problema subyacente. A menudo, un analista capacitado puede emitir un juicio sobre la causa de los errores y determinar cómo corregirlos, pero, por lo general, se ve abrumado por la gran cantidad de observaciones. La mejor técnica es la que combina ambos procedimientos y consiste en presentar al analista listas de los posibles errores generadas por computadora para que adopte las medidas pertinentes.

Las técnicas estadísticas (especificadas en los capítulos 4 y 5) son de un valor inestimable para detectar errores y, en algunos casos, para indicar cuál debería ser el valor "correcto". El cribado automático y objetivo es fundamental ante un gran volumen de datos por validar. Sin embargo, es necesario hacer un examen manual de la información de salida automática para cerciorarse de que los procedimientos automáticos están realmente funcionando de la manera esperada. La presentación de los datos en gráficos y mapas y el resumen de datos son recursos excelentes para los exámenes visuales. Estas técnicas incorporan y asimilan gran cantidad de datos y ayudan a un analista capacitado a reconocer las configuraciones que permiten evaluar la verosimilitud física, determinar datos anómalos, descubrir datos sospechosos y evaluar el rendimiento de los procedimientos automáticos.

Todas las observaciones deberían marcarse debidamente con banderines. Se deberán introducir las correcciones o los datos que se estiman correctos en la base de datos. Sin embargo, los datos originales también se habrán de conservar en dicha base. Una vez concluidos los procedimientos de control de calidad, corrección y edición, el conjunto de datos final deberá someterse a un

nuevo ciclo de control de calidad. Este último paso ayudará a asegurarse de que no se han introducido errores durante los procedimientos de control de calidad. Una nueva revisión manual debería ayudar a determinar también configuraciones de error que puedan provenir, por ejemplo, de los programas informáticos, o de una observancia insuficiente o inadecuada de las instrucciones o de los procedimientos. Estas configuraciones deben comunicarse al gestor del programa de observación del SMHN.

Por lo general, en una base de datos, un valor dado se halla disponible en diferentes etapas del control de calidad. Los datos originales que recibe la base de datos deben conservarse como tales, pero, a menudo, estos sufren modificaciones durante el proceso de validación. Estas diferentes etapas del valor se indican mediante banderines de calidad. Podrían establecerse muchos banderines, pero su cantidad debería limitarse al mínimo necesario para describir la evaluación de la calidad y la fiabilidad de los datos brutos y de los valores estimados. Una clave de banderines que utilice dos dígitos, uno para el tipo de datos y otro para la fase de validación, puede satisfacer la mayoría de los requisitos. Cuando los datos adquiridos procedan de diversas fuentes, a menudo, conviene utilizar un tercer banderín relativo a la fuente. En las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran ejemplos de las claves referentes al "tipo de datos", la "fase de validación" y el "método de adquisición", respectivamente.

**Tabla 3.1. Ejemplo de claves de tipo de datos**

| <i>Clave de tipo de dato</i> | <i>Significado</i>                                                              |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 0                            | Datos originales                                                                |
| 1                            | Datos corregidos                                                                |
| 2                            | Reconstruidos (por ejemplo, mediante interpolación, estimación o desagregación) |
| 3                            | Valor calculado                                                                 |

**Tabla 3.2. Ejemplo de clave de banderín de fase de validación**

| <i>Clave de fase de validación</i> | <i>Significado</i>                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                  | Datos faltantes (datos no recibidos u observaciones no realizadas)                                                                                                                     |
| 2                                  | Datos eliminados una vez terminados los controles                                                                                                                                      |
| 3                                  | No controlados (datos históricos o recientemente introducidos sin haber sido objeto de ningún control)                                                                                 |
| 4                                  | Declarados dudosos por ser considerados anómalos tras los controles preliminares, a la espera de controles (datos posiblemente erróneos)                                               |
| 5                                  | Declarados dudosos tras controles automáticos o supervisión humana (datos probablemente erróneos)                                                                                      |
| 6                                  | Declarados validados tras controles automáticos o supervisión humana (pero admiten nueva modificación, por ejemplo, si un estudio posterior revela que los datos aún pueden mejorarse) |
| 7                                  | Declarados validados tras controles automáticos y supervisión humana y no admiten nueva modificación                                                                                   |

**Tabla 3.3. Ejemplo de clave de banderín de método de adquisición de datos**

| <i>Clave de método de adquisición</i> | <i>Significado</i>                                                 |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 1                                     | Sistema Mundial de Telecomunicación                                |
| 2                                     | Introducción de datos mediante teclado                             |
| 3                                     | Red de telecomunicaciones de una estación meteorológica automática |
| 4                                     | Archivo digital de una estación meteorológica automática           |
| 5                                     | Registro manuscrito                                                |

### 3.3.2 Documentación relativa al control de calidad

Los procedimientos y algoritmos de control de calidad deberían documentarse detalladamente respecto de cada fase del proceso de datos, desde la observación hasta el archivo. La documentación es necesaria tanto para las verificaciones que efectúa el observador como para la validación inicial por parte del centro de recopilación, la validación final, el control de calidad de los formatos modificados a efectos de archivo y publicación y los controles de los resúmenes de datos.

Los usuarios de datos deberían tener acceso a registros y documentación con información detallada. El conocimiento de los procedimientos relativos al proceso de datos y al control de calidad permite a los usuarios de datos evaluar la validez de la observación. Si los datos originales se documentan y conservan debidamente, los futuros usuarios podrán evaluar el efecto de los cambios introducidos en los procedimientos sobre la validez, la continuidad o la homogeneidad del registro de datos, aplicar los nuevos conocimientos en materia de ciencias atmosféricas a los datos antiguos y, tal vez, ratificar los datos basados en nuevas técnicas y descubrimientos.

### 3.3.3 Tipos de error

A menudo, los errores en los metadatos se manifiestan como errores en los datos. Por ejemplo, un identificador de estación incorrecto puede significar que los datos correspondientes a una estación aparentemente proceden de otra, o un sello con la fecha incorrecta puede implicar que los datos aparentemente fueron observados en otro momento. La indisponibilidad de los datos correspondientes al lugar y al momento correctos debería detectarse mediante pruebas que verifiquen si figuran todos los datos; los datos que se hayan atribuido a un lugar o un momento incorrectos deberán detectarse mediante pruebas de coherencia y de tolerancia.

Los errores en los datos pueden surgir principalmente como resultado de errores atribuibles a los instrumentos, al observador o a los procesos de transmisión de datos, la introducción de datos mediante teclado y su validación, así como a la modificación de los formatos de datos y los problemas que implica resumirlos. Al establecer un conjunto de procedimientos de control de calidad, deberían considerarse todos los tipos, fuentes y causas posibles de errores y debería hacerse todo lo posible para reducirlos. Es recomendable que, al desarrollar procedimientos automáticos y semiautomáticos para señalar la presencia de errores, los diseñadores de sistemas colaboren estrechamente con el personal de control de calidad para fines operativos.

### 3.3.4 Pruebas de formato

Deberían verificarse las observaciones repetidas o las claves de formato imposible tales como caracteres alfa en un campo numérico, campos insertados o en blanco de una observación, claves de identificación imposibles y fechas imposibles. Las verdaderas causas de un error en el formato pueden deberse, entre otras cosas, a la introducción incorrecta de datos mediante el teclado, la ininteligibilidad del mensaje transmitido o un error de un operador.

Deberían adoptarse procedimientos para eliminar, o al menos reducir, los errores en los formatos. Dos métodos que se emplean comúnmente para reducir los errores al introducir datos mediante teclado consisten en la introducción por partida doble (en la que dos operadores introducen los mismos datos de forma independiente) y los algoritmos de detección de errores. La destreza del personal encargado de introducir la información, la complejidad de la observación y los recursos disponibles permitirán determinar cuál es método más conveniente. Para erradicar, o al menos detectar, errores en la transmisión deberían utilizarse técnicas de detección y corrección de errores digitales. Los errores de los operadores pueden minimizarse si los sistemas de introducción de datos se diseñan cuidadosamente, pero, incluso en el caso de los sistemas más fáciles de utilizar se requiere tener una capacitación adecuada y verificar el rendimiento.

### 3.3.5 Pruebas de completitud de datos

Para ciertos elementos, la falta de datos tiene una importancia más decisiva que para otros. Para los datos sobre extremos mensuales o fenómenos como el número de días en que se produce una precipitación superior a cierto umbral, la carencia de datos diarios puede hacer que el valor registrado resulte muy cuestionable. Los datos sobre la cantidad de lluvia mensual total también pueden resultar muy perjudicados por la indisponibilidad de datos sobre unos pocos días, sobre todo si se produjo un fenómeno de precipitación durante el período correspondiente a la falta. Por otra parte, los datos sobre la temperatura media mensual pueden verse menos afectados por la falta de datos en comparación con los casos precedentes. Para ciertas aplicaciones es necesaria la completitud de datos.

Para cada tipo de observación, los datos deberían disponerse en un orden cronológico prescrito, por estación. El inventario debería cotejarse con un archivo principal de identificadores de estación. Se debería establecer una comparación entre las observaciones que realmente se han recibido y las que se espera recibir. La ausencia de cualquier observación esperada debe señalarse con un banderín a fin de que el caso se examine ulteriormente.

### 3.3.6 Pruebas de coherencia

Los cuatro tipos principales de prueba de coherencia son la interna, la temporal, la espacial y la sumaria. Dado que los valores de los datos guardan una relación mutua tanto temporal como espacial, debería elaborarse un procedimiento integrado para examinar la coherencia. Todas las pruebas de coherencia deberían documentarse por completo mediante procedimientos, fórmulas y criterios de decisión.

La coherencia interna se basa en las relaciones físicas que existen entre los elementos climatológicos. Todos los elementos deberían verificarse exhaustivamente comparándolos con otros elementos afines dentro de cada observación. Por ejemplo, deberían verificarse los datos psicométricos para garantizar que la temperatura de bulbo seco notificada sea igual o superior a la temperatura de bulbo húmedo notificada. Del mismo modo, deberá comprobarse que la relación entre la visibilidad y el tiempo reinante se ajuste a las prácticas de observación normalizadas.

Se debería verificar la coherencia entre los datos y las definiciones. Por ejemplo, un valor máximo debe ser igual o mayor que un valor mínimo. Los límites físicos imponen reglas para las verificaciones de la coherencia interna. Por ejemplo, la duración de la insolación está limitada por la duración del día, la radiación mundial no puede ser superior a la irradiancia en lo alto de la atmósfera, la dirección del viento debe oscilar entre 0° y 360° y la precipitación no puede ser negativa.

Las pruebas de coherencia temporal examinan la variación de un elemento en el tiempo. Muchos conjuntos de datos climatológicos muestran una importante correlación en serie. Debería hacerse un control comparando la observación en cuestión con la anterior y la posterior en el ordenamiento. Basándose en la experiencia o en métodos analíticos o estadísticos, quienes examinen los datos pueden establecer la magnitud del cambio que podría experimentar un determinado elemento en cualquier intervalo de tiempo. Por lo general, este cambio depende del elemento, la estación del año, la ubicación y el lapso de tiempo transcurrido entre dos observaciones sucesivas. Por ejemplo, un descenso de 10 °C en la temperatura al cabo de una hora puede ser sospechoso, pero podría resultar muy factible si se le relacionara con el paso de un frente frío o la aparición de una brisa marina. El valor sospecho tendrá que compararse con el tiempo reinante en ese momento y tal vez con otras observaciones (tales como la dirección del viento, las observaciones por satélite y radar o la detección de relámpagos) antes de decidir si se valida o modifica. En el caso de algunos elementos, la ausencia de cambios puede ser síntoma de error. Por ejemplo, una serie de valores idénticos de la velocidad del viento puede indicar que el anemómetro no está funcionando correctamente.

Es fácil automatizar las verificaciones de la coherencia temporal. En la sección 5.5 se especifican algunas de las técnicas de análisis de series temporales, que pueden ser adaptadas con fines de



control de calidad. Las presentaciones gráficas también son una herramienta excelente para la verificación. Para facilitar el diagnóstico, deberán visualizarse varios elementos al mismo tiempo. Por ejemplo, será más fácil validar un descenso de la temperatura si también se dispone de la información que muestra el cambio de dirección de los vientos relacionado con el paso de un frente frío o la lluvia fuerte de una tormenta.

La coherencia espacial compara cada observación con observaciones efectuadas al mismo tiempo en otras estaciones de la zona. Cada observación puede compararse con las que cabría esperar en el emplazamiento teniendo en cuenta las observaciones de las estaciones vecinas. Los datos que difieren notablemente entre las observaciones esperadas y las que, de hecho, se obtienen deberán marcarse para ser sometidos a una revisión, corrección o eliminación, según proceda. Es importante reconocer que solo deberían compararse directamente las cantidades semejantes, tales como las velocidades del viento medidas a la misma altura; los valores medidos a elevaciones similares, como en una topografía plana y abierta, o valores medidos en una zona de características climatológicas semejantes. En la sección 5.9 se ofrece información detallada sobre las técnicas de estimación de datos que se requieren para este tipo de proceso de control de calidad.

Las pruebas de reducción de datos son unas de las más fáciles de efectuar. Mediante la comparación de diferentes resúmenes de datos, pueden detectarse errores en cada valor o en cada resumen. Por ejemplo, pueden calcularse las sumas y los promedios de los valores diarios correspondientes a diversos períodos como semanas, meses o años. La verificación de que el total de las doce sumas notificadas mensualmente es igual a la suma de los distintos valores diarios registrados durante un año permite hacer una verificación cruzada rápida y simple de un elemento acumulativo como la cantidad de lluvia. A veces, los errores sistemáticos en los datos de las estaciones en altitud pueden detectarse comparando los promedios mensuales con los promedios relativos al mismo lugar y altura derivados de un sistema de análisis numérico. Todo motivo de incoherencia debería examinarse y corregirse.

En general, las observaciones marítimas pueden ser sometidas a procedimientos similares a los que se aplican a las estaciones terrestres en superficie, con algunas ligeras modificaciones como consecuencia de la existencia de algunos elementos adicionales, suponiendo que existe un identificador del buque en cada observación a los efectos de ordenar la información cronológicamente y por buque. Las observaciones en altitud deben verificarse de una manera algo distinta. Deberían efectuarse algunas verificaciones cruzadas de las condiciones a nivel de superficie con las de una estación en superficie cercana o instalada en el mismo lugar. Un programa de control de calidad para controlar datos observados en altitud debería permitir el cómputo de los datos de nivel sucesivos a partir del nivel precedente, comenzando por los datos de superficie. Deberían establecerse límites para las diferencias permitidas entre los valores calculados y los valores notificados. Cualquier nivel con elementos notificados que no superen la prueba debería señalarse como sospecho, revisado o corregido.

### 3.3.7 Pruebas de tolerancia

Las pruebas de tolerancia establecen límites superiores o inferiores a los posibles valores de un elemento climatológico (tal como la dirección del viento, la nubosidad y las condiciones meteorológicas pasadas y presentes), o, en otros casos, cuando la gama teórica de valores es infinita y es poco probable que una medición se sitúe fuera de sus límites. En el segundo caso, los límites suelen depender del tiempo y la ubicación y deberían establecerse recurriendo a los valores históricos o mediante métodos de interpolación espacial. También es importante determinar y remediar rápidamente los sesgos sistemáticos que presenta la información proporcionada por los instrumentos. Debe conservarse documentación con información de las pruebas de tolerancia que se han efectuado, los límites climáticos establecidos respecto de cada elemento estudiado y las razones fundamentales para determinar dichos límites.

En general, las pruebas de tolerancia comparan un valor en cuestión con algún patrón que utiliza un umbral estadístico. Algunas de las pruebas de tolerancia simples consisten en comparar un valor observado con el valor extremo o récord o con algún múltiplo de desviaciones típicas en torno al valor promedio correspondiente a esa fecha. En el segundo caso, se ha de tener

en cuenta la posibilidad de que tal vez el elemento no tenga necesariamente una distribución simétrica o gaussiana, o que algunos valores extremos determinados a partir del multiplicador de la desviación típica puedan ser incorrectos.

Cuando se utilicen datos históricos de larga data para el control de calidad, es preferible utilizar una referencia normalizada (por ejemplo, las desviaciones típicas o una estadística de clasificación por orden no paramétrica) en lugar de una referencia absoluta. En la sección 4.4 se examinan los diversos descriptores de datos sumarios, en particular las restricciones sobre su idoneidad.

Puede que sea posible efectuar algunas pruebas de tolerancia utilizando series de datos completamente distintos, tales como datos obtenidos por satélite o por radar. Por ejemplo, una prueba muy simple para comprobar la caída o la ausencia de precipitación utilizando datos satelitales consistiría en verificar si se perciben nubes en la imagen satelital.

### 3.4 INTERCAMBIO DE DATOS CLIMÁTICOS

El intercambio de datos es fundamental para la climatología. Para los Miembros de la OMM, la obligación de compartir datos y metadatos con otros Miembros de la Organización, así como las condiciones que regulan ese traspaso a terceros, están contempladas en la Resolución 60 del Decimoséptimo Congreso Meteorológico Mundial (respecto del Marco Mundial para los Servicios Climáticos), la Resolución 25 del Decimotercer Congreso Meteorológico Mundial (respecto de los datos hidrológicos), la Resolución 40 del Duodécimo Congreso Meteorológico Mundial (respecto de los datos meteorológicos), y la Resolución XXII-6 de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (respecto de los datos oceanográficos). En estas resoluciones se abordan los conceptos de datos "esenciales" y "adicionales", y se especifica un conjunto de datos mínimos que convendría hacer público sin discriminaciones y por un importe que no supere el coste de reproducción y entrega, sin exigir el pago de los datos y productos en sí. Los Miembros pueden decidir declarar "esencial" un conjunto de datos aún mayor. El uso de formatos normalizados adoptados internacionalmente para el intercambio de datos es crucial.

Además de los mensajes CLIMAT y mensajes afines (véase la sección 4.8), se solicita a los Miembros que proporcionen datos y productos adicionales que sustentan los programas de la OMM a nivel mundial, regional y nacional y que ayuden a otros Miembros a prestar servicios meteorológicos y climatológicos en sus países. Los Miembros que proporcionan dichos datos y productos adicionales pueden imponer condiciones para su reexportación. Las comunidades dedicadas a la investigación y la enseñanza deberían gozar de un acceso gratuito y sin restricciones a todos los datos y productos intercambiados bajo los auspicios de la OMM para sus actividades no comerciales.

Diversos Miembros de la OMM ofrecen por iniciativa propia ciertos subconjuntos de sus estaciones para que formen parte de diversas redes, tales como la Red de Observación en Altitud del Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC), la Red de Observación en Superficie del SMOC, la Red Sinóptica Básica Regional y la Red Climatológica Básica Regional. La designación de una estación para que participe en esas redes conlleva la obligación de compartir los datos a nivel internacional.

Los datos también se comparten mediante el Sistema Mundial de Datos del Consejo Internacional de Ciencias (CIC). El Sistema tiene por objeto garantizar el acceso a datos solares y geofísicos y datos medioambientales conexos. Sirve al conjunto de la comunidad científica encargándose de reunir, examinar detalladamente, organizar y difundir datos e información. El Sistema recopila, documenta y archiva las mediciones y los metadatos conexos procedentes de estaciones de todo el mundo y pone estos datos a disposición de la comunidad científica gratuitamente. En algunos casos, el Sistema también proporciona productos adicionales, por ejemplo, análisis de datos, mapas de las distribuciones de los datos y resúmenes de los datos. El Sistema se ocupa de la meteorología, la paleoclimatología, la oceanografía, los gases de traza

atmosférica, la glaciología, los suelos, la geología y geofísica marinas, las manchas solares, la actividad solar, la física solar-terrestre, el resplandor celeste, la aurora y los rayos cósmicos, así como de otras disciplinas.

La OMM participa activamente en el suministro de datos al Sistema Mundial de Datos, y existen varios centros conexos que operan directamente a través de la Organización. Los centros de la OMM se ocupan del ozono y la radiación ultravioleta, los gases de efecto invernadero, los aerosoles, la profundidad óptica de los aerosoles, la radiación y la química de la precipitación. Existen diferencias en la política de acceso de datos aplicada por el Consejo Internacional de Ciencias y por la OMM. Los centros de datos del CIC intercambian datos entre sí sin ningún coste y proporcionan gratuitamente datos a los científicos de todo el mundo. Los centros de datos que operan a través de la OMM deben ajustarse a lo dispuesto en las Resoluciones 40 (Cg-XII) y 25 (Cg-XIII) antes mencionadas, que permiten la inclusión de ciertos datos o productos en el Sistema sujetos a condiciones de uso.

Además del Sistema Mundial de Datos del Consejo Internacional de Ciencias, hay muchos centros que funcionan en virtud de acuerdos de cooperación con la OMM o con los distintos SMHN. Entre estos centros se cuentan el Centro Mundial de Climatología de las Precipitaciones y el Centro mundial de datos de escorrentía (Alemania); el Centro Nacional sobre el Clima (Australia); el Centro mundial de datos sobre el ozono y la radiación ultravioleta (Canadá); el Centro Hadley de la Oficina Meteorológica (Reino Unido); y el Observatorio Terrestre Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, los Centros Nacionales de Información Ambiental, el Centro de archivos Goddard de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), la Red de la Observación océano-atmósfera en los mares tropicales (TAO) y la Red TRITON, y la Corporación Universitaria para la Investigación Atmosférica (Estados Unidos de América).

El intercambio de datos digitales resulta simple para muchos Miembros debido a la disponibilidad de una gama de sistemas de comunicación informáticos. El Sistema Mundial de Telecomunicación (SMT) es un sistema de comunicación de información meteorológica conectado prácticamente a todos los países del mundo. Puesto que es un sistema operativo con una función primordial en la predicción meteorológica mundial, presta servicios de comunicación fiables, aunque en algunos casos con poca anchura de banda. Al igual que Internet, el SMT funciona mediante un conjunto de redes conectadas entre sí. Sin embargo, al ser un sistema cerrado, no está expuesto a las infracciones de seguridad que a menudo sufre Internet. Los enlaces de comunicación abierta tales como Internet deberían estar protegidos mediante los mejores sistemas de seguridad informática disponibles para minimizar el riesgo de un acceso no deseado y la manipulación o corrupción de archivos.

Es muy poco probable que los formatos archivados utilizados para datos climatológicos por un país sean iguales que los utilizados por otros. La documentación del formato en la que se describen la organización de datos, los tipos de elementos, las unidades y cualquier información pertinente debería acompañar a los datos. Además, si los datos digitales se encuentran en forma compacta o en cualquier formato que no sea un texto, resulta muy útil que el centro de archivos contribuyente ofrezca procedimientos de "lectura" habituales que acompañen a los datos digitales solicitados a un archivo.

Los acuerdos internacionales para el intercambio de datos permiten la compilación mundial de publicaciones sobre normales climatológicas como los *Registros meteorológicos mundiales* y *Monthly Climatic Data for the World*. Los acuerdos bilaterales y mundiales también son importantes para elaborar e intercambiar conjuntos de datos a largo plazo, tales como la Red mundial de datos climatológicos históricos, el Conjunto completo de datos de referencia aerológicos y el Conjunto completo de datos océano-atmósfera, compilados por los Estados Unidos de América, y el conjunto de datos de observación mundiales del Centro Hadley, compilados por el Reino Unido. Por lo general, estos conjuntos de datos se suministran a los centros de investigación.

Los sistemas de información actuales de la OMM se han desarrollado con el propósito de satisfacer un conjunto diverso de necesidades de diferentes programas y comisiones. La gran cantidad de sistemas ha dado lugar a incompatibilidades, la ineficiencia, la duplicación de esfuerzos y la elevación de costos generales para los Miembros. Una alternativa para hacer más eficiente la transmisión de datos e información entre los países es el Sistema de Información

de la OMM (WIS). Se prevé que este sistema se utilizará para la recopilación y transmisión de información de interés para todos los programas de la OMM y los programas internacionales afines. Podrían incluirse datos medioambientales no meteorológicos y no climáticos y datos geofísicos, tales como los datos ecológicos y los relativos a terremotos y tsunamis. La visión del WIS constituye una orientación para la transición ordenada de los sistemas existentes a un sistema integrado que responda de manera eficiente a las necesidades de los Miembros en cuanto a información sobre el medio ambiente internacional.

El WIS proporcionará un método integrado para la recopilación ordinaria y la difusión automática de los datos y productos de observación, la entrega oportuna de datos y productos y las solicitudes de datos y productos. Deberá ser fiable, rentable y asequible tanto para los países en desarrollo como para los desarrollados. También deberá ser sostenible desde el punto de vista tecnológico y adecuado para los expertos locales, así como modular, escalable, flexible y ampliable. Deberá ser capaz de ajustarse a las diferentes necesidades, permitir la difusión de productos de diversas fuentes de datos y permitir a los participantes que colaboren a un nivel que sea adecuado respecto de sus responsabilidades y recursos presupuestarios. El WIS debería también facilitar la adaptación a diversos grupos de usuarios y políticas de acceso, como las definidas en las Resoluciones 40 (Cg-XII) y 25 (Cg-XIII), la seguridad de los datos y las redes y la integración de diversos conjuntos de datos.

### 3.5 RESCATE DE DATOS

El rescate de datos conlleva la organización y la conservación de datos climáticos que corren el riesgo de perderse debido al deterioro, la destrucción, la desatención, la obsolescencia técnica o la simple dispersión de los datos climáticos con el paso del tiempo. Los datos no digitalizados corren peligro por la vulnerabilidad del registro original en papel. El rescate de datos supone la organización de los registros en papel, microfilm y microficha y la correspondiente obtención de imágenes; el tecleo de datos numéricos y textuales y la digitalización de datos de bandas en un formato utilizable, y el archivo tanto de datos y metadatos como de los procedimientos y los resultados del control de calidad. En la tabla 3.4 se proporciona un panorama general de los componentes de las actividades de rescate de datos climáticos.

**Tabla 3.4. Componentes de las actividades de rescate de datos climáticos**

| <i>Componentes del rescate de datos</i>               | <i>Actividades</i>                                                       | <i>Palabras clave</i>                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Archivo de soportes en papel y microfilm o microficha | Búsqueda y localización                                                  | SMHN, emplazamientos de observación, universidades, organismos aeronáuticos y marítimos, organizaciones agrícolas, bases de datos y bibliotecas internacionales, archivos nacionales |
|                                                       | Conservación y almacenamiento                                            | Limpieza de soportes; colocación en cajas de archivo etiquetadas, exentas de ácido, y a prueba de polvo, humedad y plagas                                                            |
|                                                       | Creación de un inventario electrónico de ejemplares en papel o microfilm | Catalogación de todos los soportes en papel; estimación del alcance de las medidas destinadas a la obtención de imágenes y la digitalización                                         |
| Obtención de imágenes de los soportes                 | Creación de un inventario maestro de imágenes                            |                                                                                                                                                                                      |

| <i>Componentes del rescate de datos</i> | <i>Actividades</i>                                                                                                                                                                                       | <i>Palabras clave</i>                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         | Obtención de imágenes y validación<br>Actualización del inventario maestro de imágenes<br>Creación de inventarios de archivos de imágenes en cada disco compacto o DVD, o en cada directorio informático | Actualización del inventario maestro de imágenes tras la validación de la legibilidad de las imágenes, incluidos los metadatos<br>Cotejo de los inventarios de archivos en disco compacto o DVD con el inventario maestro de imágenes |
| Digitalización de valores de los datos  | Creación de un inventario de datos digitales                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                         | Tecleado de entradas, trazado de mapas                                                                                                                                                                   | Introducción de datos en el Sistema de Gestión de Datos Climáticos                                                                                                                                                                    |
|                                         | Control de calidad de los datos                                                                                                                                                                          | Actualización del inventario de datos digitales a medida que los datos se digitalizan y superan las diversas pruebas de control de calidad                                                                                            |
| Archivo de soportes digitales           | Cotejo de soportes impresos, imágenes y datos digitales                                                                                                                                                  | Comparación de inventarios de imágenes y datos digitales con el inventario electrónico original de ejemplares en papel o microfilm                                                                                                    |
|                                         | Realización de copias de seguridad del contenido de los soportes electrónicos                                                                                                                            | A diario                                                                                                                                                                                                                              |
|                                         | Traslado de múltiples copias de los archivos de datos digitales e imágenes                                                                                                                               | A diversas ubicaciones                                                                                                                                                                                                                |
|                                         | Actualización de los soportes y migración tecnológica                                                                                                                                                    | Entre cada 5 y 10 años                                                                                                                                                                                                                |

Todo grupo o persona que se encuentre en posesión de datos (en papel, microfilm o en formato digital) debería tratar de facilitar el rescate de datos climáticos. Los responsables de la gestión del registro climático de un país deberían desempeñar un cometido especial en el rescate de datos, puesto que están en mejor disposición para comprender y valorar los datos rescatados y saber cuáles revisten mayor importancia. Con frecuencia, este personal trabaja en los departamentos de climatología de SMHN y el rescate de datos es un componente de sus responsabilidades de conservación, habida cuenta de su condición de gestores de datos climáticos. Sin embargo, los impulsores del rescate de datos pueden hallarse en muchas instituciones, de carácter tanto público (departamentos de agricultura) como privado (universidades, plantaciones, empresas agrarias). Además, se han creado organizaciones voluntarias, como la Organización Internacional para el Rescate de Datos Ambientales (IEDRO) y el proyecto internacional ACRE de reconstrucción de la circulación atmosférica sobre la Tierra, con objeto de promover el rescate de datos. Otras partes interesadas en contribuir a las actividades de rescate de datos son los climatólogos en activo y jubilados, bibliotecarios, historiadores y estudiantes. La aportación de estas personas a la ejecución de actividades de producción colectiva sería de gran valor.

Las *Directrices sobre mejores prácticas para el rescate de datos climáticos* (OMM-Nº 1182) aportan orientaciones detalladas sobre todos los aspectos del rescate de datos climáticos. El Portal internacional para el rescate de datos (I-DARE) es un recurso basado en Internet destinado a personas interesadas en la conservación, el rescate y la digitalización de datos. Brinda un único punto de entrada para la consulta de información sobre la situación de proyectos de rescate de datos, tanto pasados como actuales, realizados en todo el mundo, los datos que deben rescatarse, y métodos y tecnologías aplicados. Se trata de una vía para el intercambio de información sobre todos los aspectos del rescate de datos, con inclusión de las tecnologías de rescate consolidadas y aquellas de nueva aparición. Puesto que sus objetivos son el incremento de la visibilidad de las acciones de rescate de datos existentes, el fomento de actividades nuevas y una mejor coordinación de las iniciativas internacionales de rescate de datos, el portal I-DARE

es una herramienta de comunicación útil. El portal contribuirá también a identificar deficiencias y oportunidades, ayudará a priorizar el rescate de datos en regiones en las que esta actividad sea más necesaria y favorecerá la obtención de fondos para los proyectos.

Las fases de reorganización, obtención de imágenes, digitalización y control de calidad del proceso de rescate de datos pueden ser costosas y conllevar tiempo. El punto de partida para la instauración de un programa de esta naturaleza y su mantenimiento es el SMHN, que debe exponer argumentos convincentes que respalden la necesidad del rescate de datos. En este sentido, podría citarse la identificación de problemas de carácter práctico cuya solución residiera en unos mejores datos climáticos. Por ejemplo, gracias a los datos climáticos históricos, el SMHN podría responder a preguntas relacionadas con la frecuencia de las sequías o los episodios de precipitaciones intensas, o la dirección del viento más fuerte a lo largo de los últimos 100 años. Este tipo de información constituye un producto con un “valor añadido” por el que los directores de los SMHN podrían cobrar, aportando así ingresos adicionales al servicio. Además, la organización de los datos climáticos podría suponer la recuperación de cientos de metros cuadrados de superficie de los SMHN sin tener que desprenderse de valiosos registros históricos. Para las actividades de rescate de datos a menudo se requiere apoyo exterior a lo largo de varios años. Las personas y los grupos que ya han llevado a cabo estas actividades pueden brindar asesoramiento y abogar por la financiación de las iniciativas de rescate de datos.



## REFERENCIAS

- Organización Meteorológica Mundial, 1986: *Guidelines on the Quality Control of Surface Climatological Data* (WMO/TD-No. 111). Ginebra.
- , 2003: *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WMO/TD-No. 1186, WCDMP-No. 53). Ginebra.
- , 2007: *Directrices sobre la gestión de datos climáticos* (OMM/TD-Nº 1376, WCDMP-Nº 56). Ginebra.
- , 2014: *Climate Data Management System Specifications* (WMO-No. 1131). Ginebra.
- , 2015: *Decimoséptimo Congreso Meteorológico Mundial: Informe final abreviado con resoluciones* (OMM-Nº 1157). Ginebra.
- , 2016: *Guidelines for Best Practices for Climate Data Rescue* (WMO-No. 1182). Ginebra.

## LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- Cornford, D., 1998: "An overview of interpolation", en *Seminar on Data Spatial Distribution in Meteorology and Climatology* (M. Bindi y B. Gozzini, eds). Volterra, European Union COST Action 79.
- Cravatte, S., W. S. Kessler, N. Smith, S. E. Wijffels y otros, 2016: *First Report of TPOS 2020*. GOOS-215, disponible en: <http://tpos2020.org/first-report/>
- De Gaetano, A.T., 1997: "A quality control procedure for hourly wind data", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 14:137–151.
- Graybeal, D.Y., A.T. De Gaetano y K.L. Eggleston, 2004: "Complex quality assurance of historical hourly surface airways meteorological data", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21:1156–1169.
- Servicio Meteorológico de Hungría, 1997: *Proceedings of the First Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data* (Budapest, 6 a 12 de octubre de 1996). Budapest.
- Organización Internacional de Normalización, 2015: *ISO 9000:2015 Sistemas de gestión de la calidad — Fundamentos y vocabulario*.
- , 2015: *ISO/IEC 17021-1:2015 Evaluación de la conformidad — Requisitos para los organismos que realizan la auditoría y la certificación de sistemas de gestión*.
- , 2018: *ISO 9004:2018 Gestión de la Calidad – Calidad de una organización – Orientación para lograr el éxito sostenido*.
- Kresse, W. y K. Fadaie, 2004: *ISO Standards for Geographic Information*. Berlín, Springer.
- Merlier, C., 2001: *Interpolation des données spatiales en climatologie et conception optimale des réseaux climatologiques*. Anexo del informe de Météo-France sobre sus actividades en relación con la Comisión de Climatología de la OMM (informe de la OMM - Ponente principal de la Comisión de Climatología sobre métodos estadísticos, en particular sobre interpolación espacial).
-

## **CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA A PARTIR DE CONJUNTOS DE DATOS**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Cada año se van añadiendo más datos a los archivos climatológicos de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN). Los climatólogos deben ser capaces de expresar toda la información pertinente contenida en los datos utilizando un número relativamente pequeño de valores obtenidos mediante una serie de métodos estadísticos. Cuando se escogen y se aplican cuidadosamente, los procesos estadísticos pueden distinguir y poner de relieve información pertinente contenida en los datos.

Este capítulo se centra en la estadística descriptiva, herramienta utilizada para resumir las propiedades de un gran volumen de datos de manera comprensible. Muchos de los métodos expuestos en este capítulo son más eficaces cuando se utilizan con computadoras para procesar y presentar datos. Sin embargo, es necesario advertir de los peligros de una aplicación demasiado mecánica de los métodos de análisis automáticos, debido a que es muy fácil utilizar inadecuadamente los procedimientos e interpretar erróneamente los resultados. Si bien el uso de computadoras comporta ventajas incuestionables, existe el riesgo de que las suposiciones implícitas de la mayoría de los programas informáticos de análisis no se tomen en cuenta o no se expresen claramente, lo que puede conllevar a resultados erróneos.

El capítulo 5 se centra en métodos estadísticos y debería consultarse conjuntamente con el presente capítulo. Ambos tienen por objeto describir conceptos básicos en lugar de especificar detalles de temas complejos. Las referencias que figuran al final del capítulo y los libros de texto sobre teoría y métodos estadísticos ofrecen información más detallada.

### **4.2 EVALUACIÓN DE LOS CONJUNTOS DE DATOS**

Un conjunto de datos consiste en una colección de observaciones de elementos. Una observación es una sola estimación de cierta cantidad. Las observaciones simples consisten en, por ejemplo, la lectura de un termómetro o del nivel de agua en un pluviómetro. Otras observaciones son más complejas. Por ejemplo, la obtención de la presión barométrica de un barómetro de mercurio implica hacer observaciones tanto de la longitud de la columna de mercurio como de la temperatura del barómetro. La presión se considera como una sola observación.

Algunos elementos son continuos, es decir, no hay discontinuidades en el estado del fenómeno observado, tal como la temperatura del aire. Otros elementos, como la precipitación, no son continuos, y también hay otros que no poseen valores cuantitativos, sino solo una categoría descriptiva, tal como un tipo de nube o las condiciones meteorológicas reinantes. La población constituye todos los valores posibles de un elemento. Si un elemento es continuo, la población será en teoría infinita. Si el elemento no es continuo, la población consiste en todos los valores específicos que puede tener el elemento dentro de los límites establecidos por el analista.

Una muestra es un conjunto de observaciones de la población, que se toma para representar a toda la población. Los conjuntos de datos son muestras. Cuanto mayor sea la muestra, más exacta será la estimación de las características descriptivas de la población. Buena parte de la climatología se ocupa del estudio de muestras, pero el analista debe reconocer que un conjunto de datos puede ser representativo de solo una parte de la población. La influencia, por ejemplo, de la falta de homogeneidad, la dependencia del tiempo y las variaciones en el espacio complican la interpretación de lo que representa el conjunto de datos.

Antes de describir o utilizar un conjunto de datos, debería comprobarse la exactitud y validez de los mismos. La exactitud consiste en el carácter correcto de los datos, mientras que la validez se

refiere a la aplicabilidad de los datos a la finalidad para la que se utilizarán los valores. El usuario de conjuntos de datos nunca debería suponer sin confirmación que un conjunto de datos es exacto y válido, especialmente sin disponer de la información pertinente del proceso de control de calidad aplicado durante el montaje del conjunto de datos. También es importante saber de qué manera se han recopilado, procesado y compilado los datos y, a veces, incluso saber el motivo inicial por el que se recopilaron. En el capítulo 3 se aborda la gestión de datos climáticos y las secciones 3.2 y 3.3 se refieren a la importancia de los metadatos y al control de la calidad, respectivamente.

### 4.3 VISUALIZACIÓN CUALITATIVA DE LOS DATOS

Algunas de las características básicas que se suelen buscar en un conjunto de datos son el valor medio o típico, la extensión o gama de las observaciones, la existencia de observaciones inesperadas, la manera en la que las observaciones se desvían de cada lado del valor medio y la aglutinación de las observaciones. Sin una organización sistemática, no es posible interpretar grandes volúmenes de datos para encontrar estas y características similares. El primer paso es comprender los datos de manera general mediante la visualización de la distribución de los valores observados.

Existen muchas maneras de presentar los datos para obtener una apreciación cualitativa de lo que los datos revelan al climatólogo. Una manera de organizar un conjunto de datos consiste en ordenar las observaciones por magnitud ascendente y descendente. Las observaciones ordenadas pueden entonces presentarse gráficamente o como un cuadro, gracias a lo cual se hacen evidentes algunas características, tales como los valores extremos y la gama.

Una segunda manera de organizar un conjunto de datos es agrupar los datos en intervalos. Se efectúa un conteo del número de observaciones en cada intervalo. Una visualización del número de casos o el porcentaje del número total de observaciones en cada intervalo da una indicación inmediata de la forma de la distribución de los valores de la población y recibe el nombre de distribución de frecuencias o histograma (figura 4.1). El número de intervalos es arbitrario y la visualización de la distribución en un gráfico se ve afectada por el número de intervalos. Parte de la información contenida en el conjunto de datos originales se pierde cuando las observaciones son agrupadas y, en general, cuantos menos intervalos se produzcan, mayor será la pérdida.

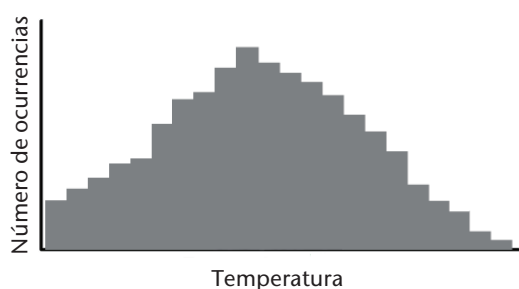


Figura 4.1. Distribución de frecuencias (histograma)

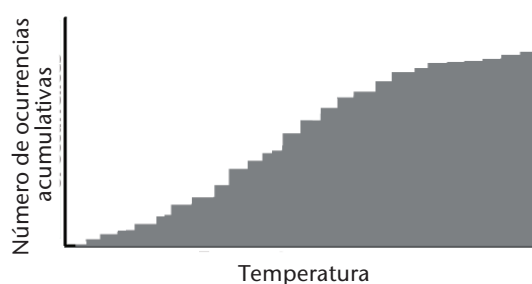
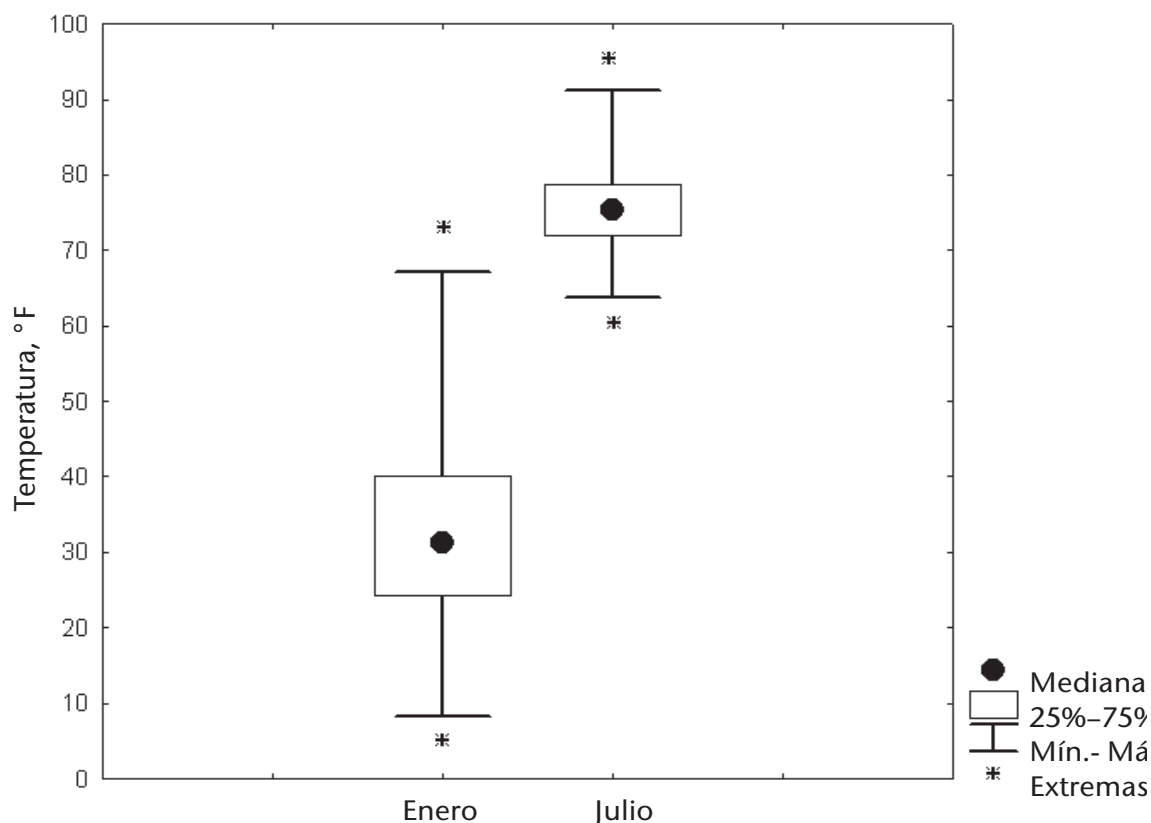


Figura 4.2. Distribución de frecuencias acumulativas



**Figura 4.3. Diagrama de cajas**

El número de intervalos debería asegurar un equilibrio entre la exactitud, la facilidad de comunicación, la utilización que se le va a dar a la información y las pruebas estadísticas a las que se someterán los datos.

Un tercer método de organización consiste en formar una distribución de frecuencias acumulativas, también denominada ojiva. Se traza un gráfico de número acumulativo o porcentaje de las observaciones respecto de los valores ordenados del elemento (figura 4.2). Este tipo de representación de los datos es útil para determinar qué proporción de los mismos es superior o inferior a cierto valor. La proporción de valores inferiores a cierto valor, expresada en un porcentaje, se denomina un percentil (un 1 % de las observaciones son inferiores al primer percentil, un 2 % son inferiores al segundo percentil, y así sucesivamente). Asimismo, una proporción basada en décimos se denomina un decil (un décimo de las observaciones se halla por debajo del primer decil, dos décimos se hallan por debajo del segundo decil, y así sucesivamente). Una basada en cuartos se denomina un cuartil. Una basada en quintos se llama un quintil y tiene un uso específico en los cálculos de las normales de precipitación (véase la sección 4.8.6).

Otras visualizaciones incluyen los diagramas de cajas (figura 4.3), los diagramas de tallo y hojas (figura 4.4) y las tablas de ordenación de datos (figura 4.5). Si la secuencia de los datos es importante, puede trazarse un gráfico de los valores observados en función del tiempo para producir una serie temporal (véase la sección 4.6). En cuanto a los datos con dos elementos, tales como la velocidad y dirección del viento, pueden elaborarse diagramas de dispersión trazando el valor del primer elemento respecto del valor del segundo (véase la sección 4.5.2). Las rosas de los vientos también proporcionan excelentes representaciones de la información sobre el viento. Las curvas de doubles masas, a menudo utilizadas por los hidrólogos y para la detección de la homogeneidad de los datos, se elaboran trazando el valor acumulativo de un elemento respecto del valor acumulativo del segundo elemento (véase la sección 5.2). Las técnicas de visualización

solo están limitadas por la imaginación del analista, pero todas las técnicas implican ordenar y clasificar los datos. Independientemente de la técnica que se use, el gráfico resultante debería ser informativo y debería evitar llevar a los usuarios a conclusiones infundadas.

#### 4.4 DESCRIPTORES CUANTITATIVOS SUMARIOS DE DATOS

En lugar de presentar el conjunto de datos completo para ilustrar una característica concreta, a menudo, es útil extraer varias medidas de resumen cuantitativas. Las medidas de resumen ayudan a describir pautas de variación de las observaciones. Si se comprenden dichas pautas, será posible ampliar los conocimientos sobre los procesos físicos que subyacen a las observaciones y deducir mejor las condiciones climáticas pasadas y presentes.

Debe tenerse buen cuidado de que los contenidos de un conjunto de datos que se hayan resumido mediante medidas cuantitativas sean realmente comparables. Por ejemplo, una serie de observaciones de la temperatura pueden ser comparables si todas se miden con los mismos instrumentos, al mismo tiempo cada día, en el mismo lugar y con los mismos procedimientos. Si cambian los procedimientos, pueden introducirse variaciones artificiales en el conjunto de

| Tallo    |   |   |   | Hojas |          |          |   |   |
|----------|---|---|---|-------|----------|----------|---|---|
| 0        | 5 | 7 | 8 |       |          |          |   |   |
| 1        | 2 | 3 | 3 | 7     | 9        |          |   |   |
| <b>2</b> | 1 | 3 | 4 | 4     | <b>5</b> | <b>5</b> | 7 | 8 |
| 3        | 2 | 2 | 4 | 5     | 6        | 7        | 8 | 9 |
| 4        | 4 | 5 | 5 | 6     | 6        | 6        | 6 | 7 |
| 5        | 2 | 3 | 3 | 3     | 4        | 8        | 8 |   |
| 6        | 1 | 1 | 3 | 3     | 4        | 5        |   |   |
| 7        | 2 | 2 | 5 | 5     | 7        |          |   |   |
| 8        | 4 | 6 | 7 | 7     |          |          |   |   |

**Figura 4.4. Ejemplo de una presentación de datos mediante un diagrama de tallo y hojas. El dígito inicial del valor de una observación es el tallo y el dígito final es la hoja. En la tabla hay, por ejemplo, dos observaciones de 25**

| Año  | Mes |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|      | 1   | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| 1961 | 23  | 33 | 44 | 50 | 59 | 64 | 79 | 76 | 61 | 50 | 44 | 32 |
| 1962 | 26  | 31 | 40 | 54 | 60 | 67 | 78 | 73 | 60 | 49 | 40 | 30 |
| 1963 | 27  | 35 | 43 | 55 | 58 | 68 | 77 | 72 | 58 | 52 | 43 | 32 |
| 1964 | 24  | 37 | 47 | 58 | 57 | 64 | 79 | 74 | 59 | 54 | 46 | 34 |
| 1965 | 27  | 32 | 43 | 56 | 57 | 65 | 76 | 74 | 58 | 53 | 47 | 44 |
| 1966 | 30  | 38 | 44 | 53 | 58 | 67 | 80 | 75 | 58 | 55 | 46 | 32 |
| 1967 | 19  | 35 | 47 | 55 | 61 | 66 | 74 | 73 | 60 | 56 | 43 | 30 |
| 1968 | 22  | 33 | 46 | 56 | 60 | 69 | 78 | 70 | 56 | 52 | 45 | 30 |
| 1969 | 28  | 37 | 43 | 51 | 56 | 70 | 76 | 72 | 54 | 52 | 44 | 34 |
| 1970 | 25  | 34 | 46 | 56 | 58 | 63 | 73 | 71 | 54 | 50 | 43 | 31 |

**Figura 4.5. Ejemplo de una ordenación de datos**

datos (véanse las secciones 3.3, 3.4 y 5.2). A veces, los descriptores sumarios de un conjunto de datos detectan variaciones imprevistas; todas las pautas imprevistas deberán examinarse para determinar si son provocadas artificialmente o son efectos reales del sistema climático.

#### 4.4.1 **Modelización de datos de la distribución de frecuencias**

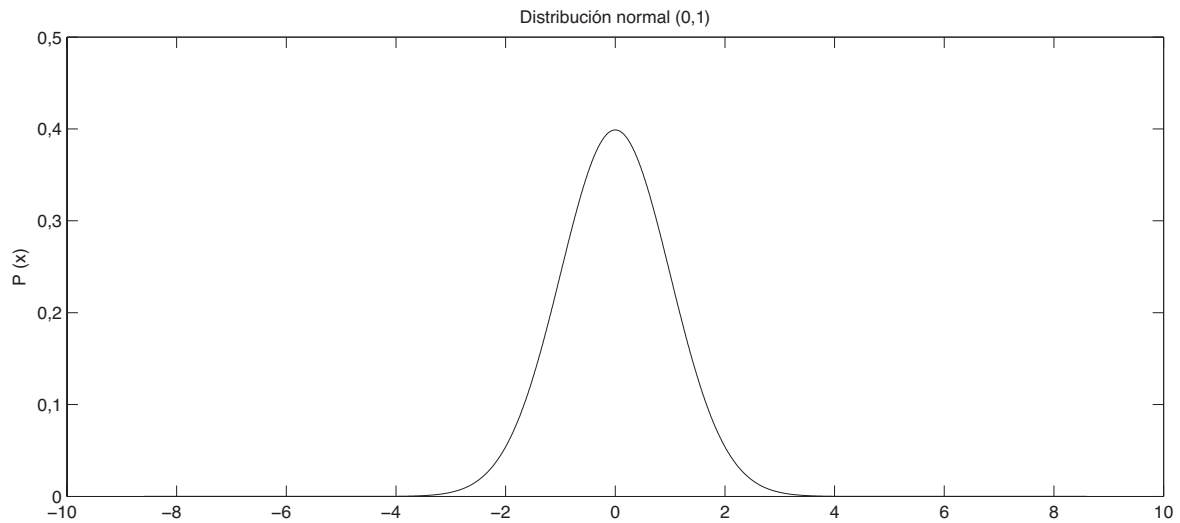
Las visualizaciones de datos (véase la sección 4.3) proporcionan una visión cualitativa de la estructura de una serie de observaciones. Las formas y las pautas resultan evidentes. Las distribuciones de frecuencias pueden clasificarse según su forma en:

- curvas simétricas unimodales: estas curvas se usan normalmente para los promedios de los elementos, como la temperatura media anual y a más largo plazo. Por lo general, cuanto más largo sea el período de promediación, más simétrica será la distribución;
- curvas moderadamente asimétricas unimodales: muchas curvas de datos promediados son principalmente (pero no del todo) simétricas;
- curvas muy asimétricas unimodales: estas formas no son nada simétricas y muestran un elevado grado de desviación; son comunes para las cantidades de precipitación y velocidades del viento;
- curvas en forma de U: estas curvas son comunes para elementos que tienen límites bilaterales, tales como la fracción de nubosidad (hay mayor tendencia de que los cielos estén en su mayoría despejados o en su mayoría cubiertos), y
- curvas multimodales o complejas: estas curvas son comunes para los elementos observados diariamente en zonas con marcados contrastes estacionales. En tal caso, la curva de distribución de frecuencias elaborada utilizando el conjunto de datos completos puede tener una forma bimodal muy característica. Probablemente es más fácil comprender los conjuntos de datos con distribuciones de frecuencias muy complejas mediante una estratificación de datos *a priori* para reflejar los diferentes procesos subyacentes.

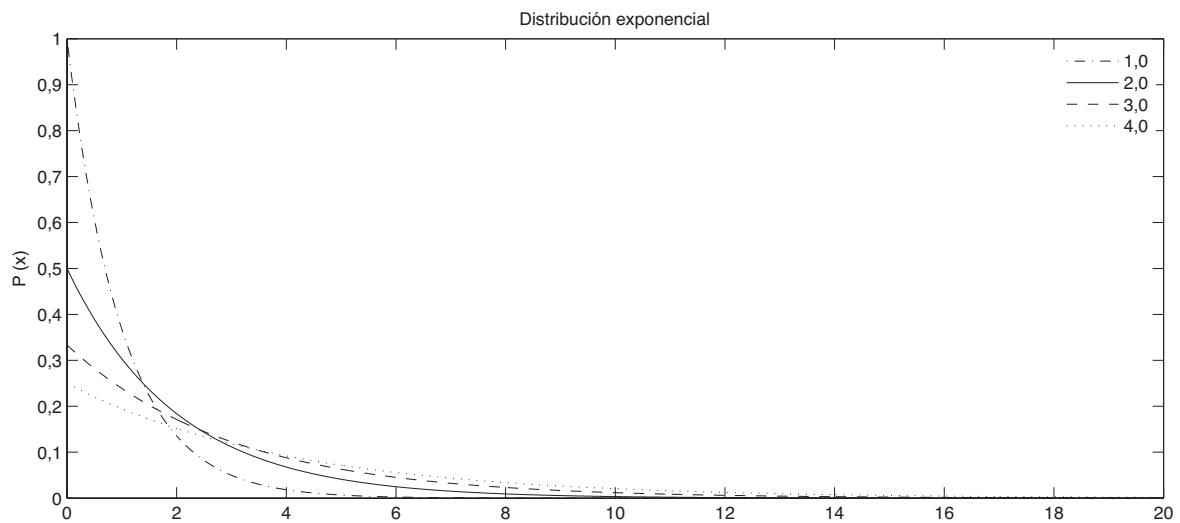
Existen varias series de observaciones que pueden simplificarse examinando la distribución de observaciones de una variable cuando se observan valores concretos de otras variables. Los resultados se conocen como frecuencias condicionales. A menudo, las condiciones se basan en un conocimiento previo de lo que cabe esperar o en información sobre la probabilidad de que ocurran ciertos fenómenos. El análisis de las frecuencias condicionales es particularmente útil para desarrollar escenarios climáticos y para determinar las repercusiones locales de fenómenos tales como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y otros patrones de teleconexión (relaciones estadísticas estrechas entre las pautas meteorológicas de diferentes partes de la Tierra).

Un método para resumir la distribución de un conjunto de observaciones consiste en ajustar una distribución de probabilidad a las observaciones. Estas distribuciones son funciones con propiedades matemáticas conocidas que se caracterizan por un reducido número de parámetros (normalmente no más de tres). Las funciones siempre se construyen de modo que las magnitudes relativas de los diferentes valores reflejen diferencias en las probabilidades relativas de observar dichos valores. Varias distribuciones de probabilidad comunes, como la distribución normal (o gaussiana) y la distribución de valores extremos generalizada, permiten describir situaciones que ocurren a menudo en la naturaleza. Si es posible describir una frecuencia observada o una distribución de frecuencias condicional mediante estas funciones conocidas de densidad de probabilidad, las propiedades y las relaciones pueden utilizarse para analizar los datos y hacer deducciones probabilísticas y estadísticas. En las figuras 4.6 a 4.12 se muestran algunos ejemplos de funciones de densidad de probabilidad que pueden aproximarse a distribuciones de frecuencias observadas de datos continuos (en las que puede observarse cualquier valor en una serie continua).

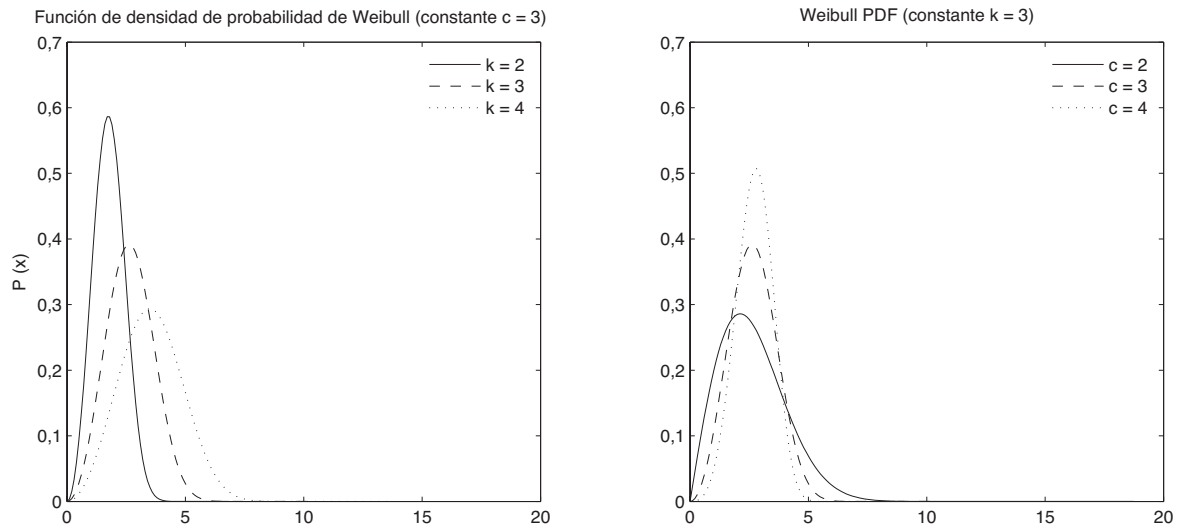




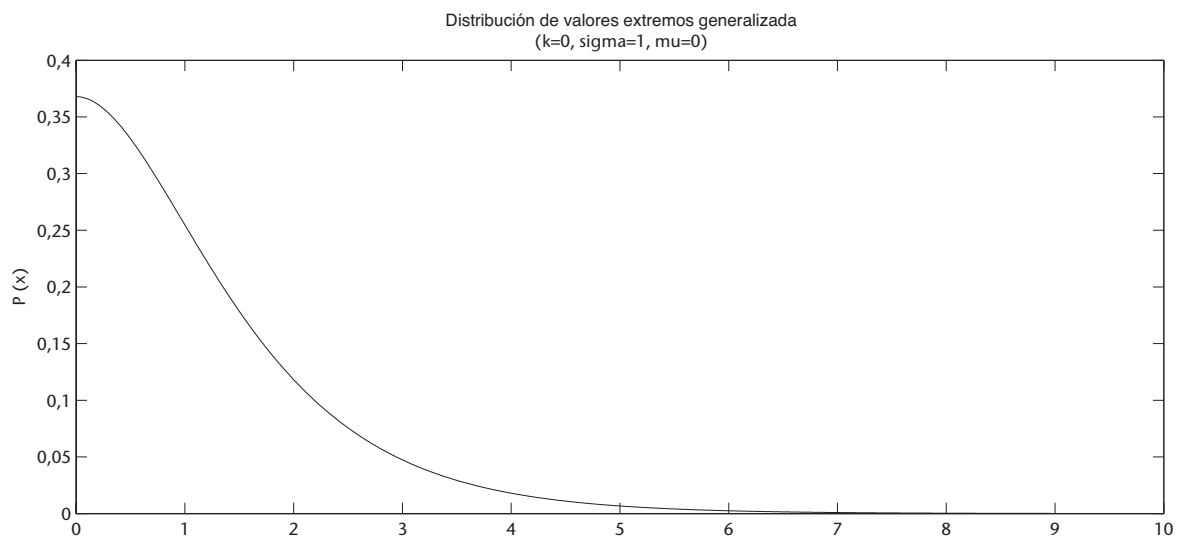
**Figura 4.6. Distribución normal o gaussiana: los valores de la gama relativos a la propiedad observada suelen aglutinarse uniformemente en torno a un solo valor, como el de las temperaturas medias anuales**



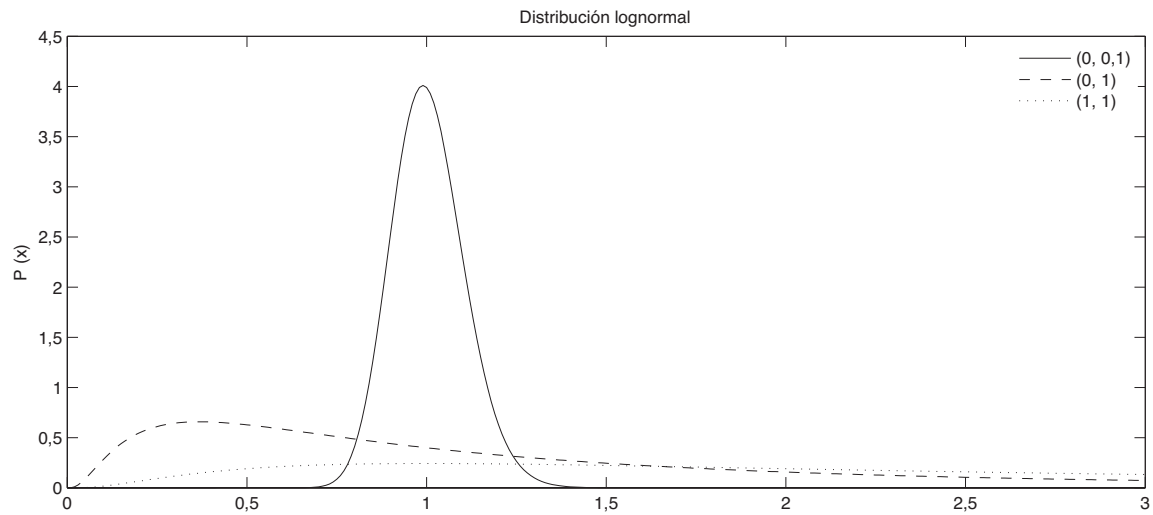
**Figura 4.7. Distribución exponencial: describe los tiempos transcurridos entre fenómenos a lo largo de un proceso en el que estos se producen continua e independientemente a un ritmo medio constante. Se ha utilizado en el análisis de la cantidad de precipitación diaria.**



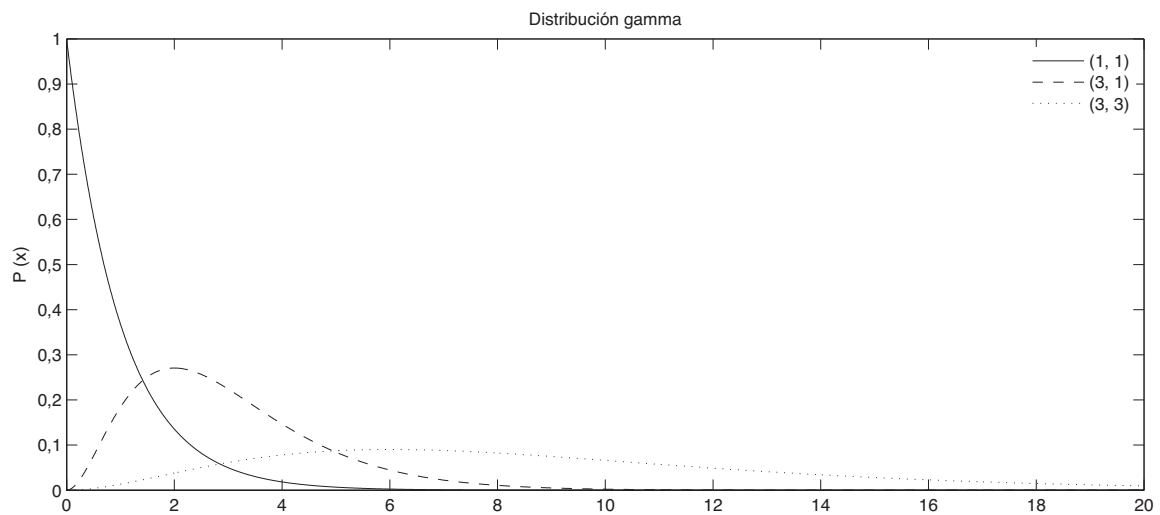
**Figura 4.8. Distribución de Weibull: describe los tiempos transcurridos entre fenómenos a lo largo de un proceso en el que estos se producen continua e independientemente a un ritmo variable. Se ha utilizado en el análisis de la velocidad del viento.**



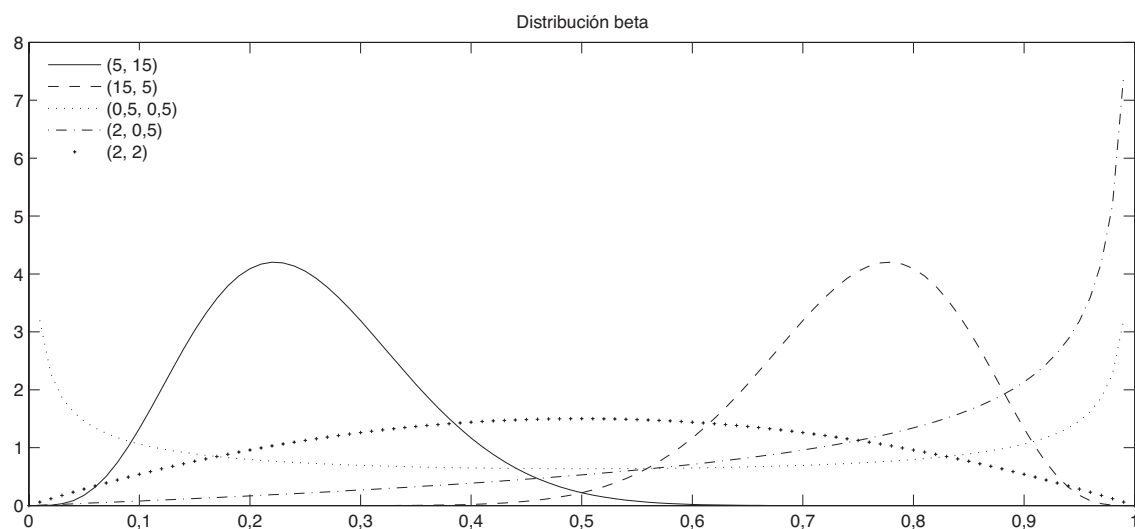
**Figura 4.9. Distribución de valores extremos generalizada: se utiliza para establecer modelos de valores extremos en una distribución.**



**Figura 4.10. Distribución lognormal:** se utiliza cuando el logaritmo de una distribución sigue la distribución normal, tal como la de las concentraciones de partículas de contaminación atmosférica

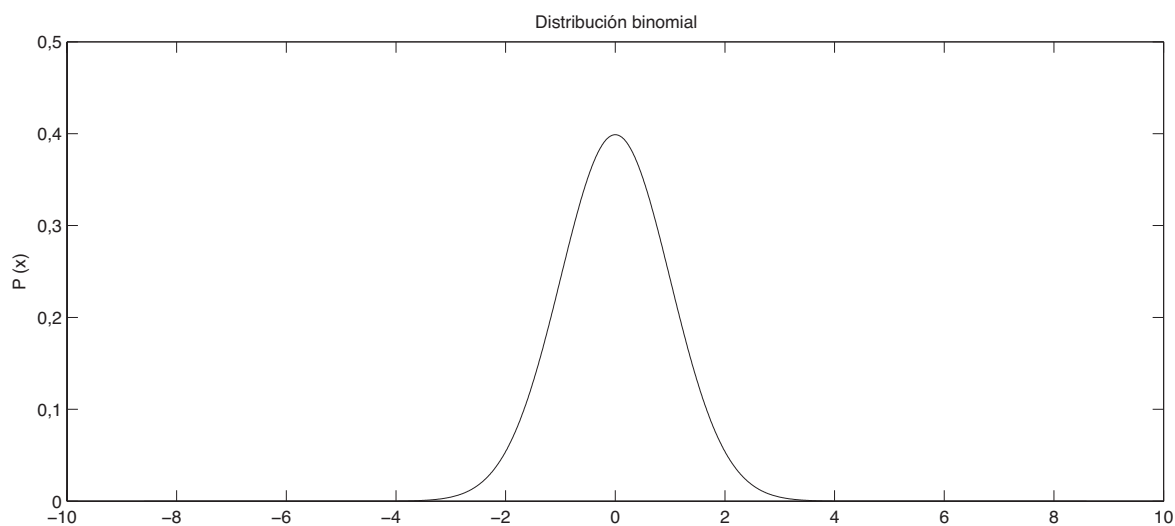


**Figura 4.11. Distribución gamma:** indica las distribuciones que están delimitadas en un extremo y son asimétricas, como los datos sobre la precipitación

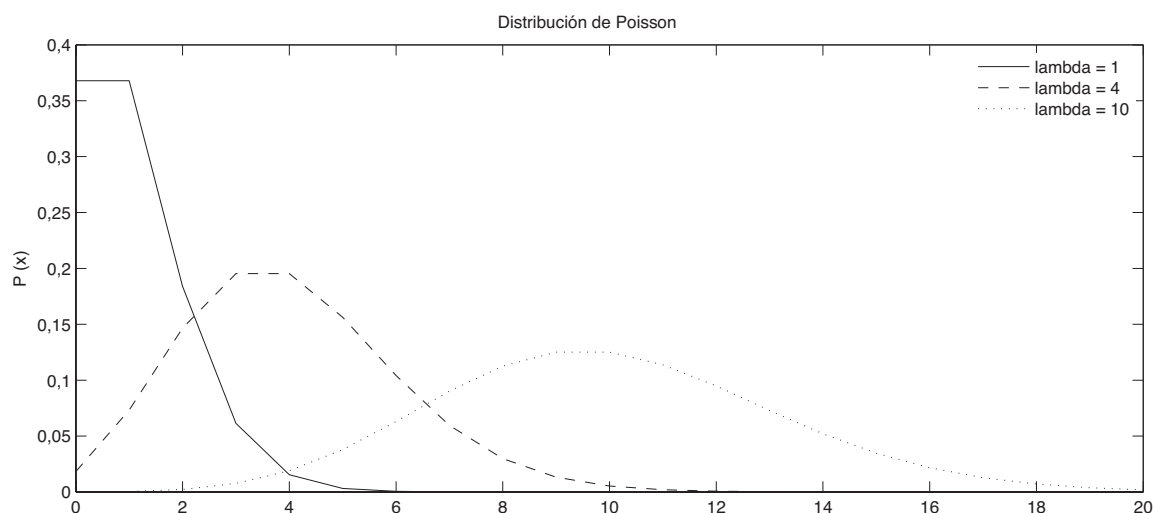


**Figura 4.12. Distribución beta: indica las distribuciones que están delimitadas en ambos extremos, tales como la nubosidad**

Las distribuciones de frecuencias estadísticas también están indicadas para describir datos que solo pueden alcanzar valores discretos específicos. Por ejemplo, el número de días en los que cae precipitación en un mes; en este caso, solo son posibles los valores íntegros hasta un valor máximo de 31. En las figuras 4.13 y 4.14 se muestran algunas de las distribuciones de frecuencias estadísticas que indican datos discretos.



**Figura 4.13. Distribución binomial: indica dos resultados discretos, como el acaecimiento o la ausencia de un fenómeno.**



**Figura 4.14. Distribución de Poisson: describe fenómenos poco comunes, como la frecuencia con que se producen tormentas tropicales.**

A menudo, la visualización cualitativa de una distribución de frecuencias observada indica cuál de las distribuciones de frecuencias estadísticas puede ser adecuada para describir los datos. Si puede emplearse una distribución de frecuencias estadística con relaciones probabilísticas conocidas para describir los datos, podrán hacerse deducciones sobre los datos. Existen métodos específicos para ajustar las distribuciones a las observaciones, tales como los métodos de momentos, momentos de probabilidad ponderada (momentos-L) y probabilidad máxima. Es necesario comprender la teoría estadística que fundamenta una función de distribución para hacer deducciones correctas sobre los datos objeto de su aplicación.

Cualquier serie de observaciones puede modelizarse mediante funciones matemáticas que reproducen las observaciones. Es necesario actuar con cautela al aplicar dichas técnicas debido a varios motivos. Por ejemplo, en la aplicación de una función matemática, por lo general, se supone que el conjunto de datos de observación, habitualmente una muestra, es bastante representativa de la población de la que se extrae y que en los datos no hay errores (véase la sección 3.4). La finalidad principal de ajustar una función es aproximar la distribución de las observaciones. Si el ajuste es aceptable, con solo unos pocos parámetros, la función sumaria de las observaciones debería ofrecer una descripción realista de los datos que sea compatible con los principios físicos subyacentes en una forma suavizada que hace caso omiso de los errores en los datos. Una finalidad secundaria del ajuste es describir los datos en un contexto teórico que sea lo suficientemente simple como para que puedan hacerse deducciones estadísticas. El sobreajuste de un modelo matemático puede dar lugar a una descripción no realista de los datos puesto que se ponderan demasiado los errores en los datos o los factores aleatorios que son ajenos a los procesos sometidos a estudio. El grado de suavizamiento suele depender de la finalidad del uso de los datos y de las preguntas que está tratando de responder el climatólogo.

La exactitud con la que una función sumaria describe las observaciones puede determinarse examinando las diferencias existentes entre las observaciones y los valores obtenidos de la función. Deberían efectuarse pruebas objetivas de la calidad del ajuste. Por lo general, los conjuntos de datos se pueden modelizar con más de una función, y las medidas obtenidas en las pruebas pueden compararse para buscar el ajuste más adecuado o más útil. Normalmente, se utilizan las pruebas de chi-cuadrado y Kolmogorov-Smirnov. La calidad de ajuste determinada por la primera supone que los valores de los datos son discretos e independientes (ninguna observación se ve afectada por otra observación). Si la suma de los cuadrados de las diferencias existentes entre las frecuencias observadas y las ajustadas excede un umbral que depende del tamaño de la muestra, el ajuste debería considerarse inadecuado. Esta prueba es sensible al número de intervalos. La prueba Kolmogorov-Smirnov parte de la hipótesis de que si la

máxima diferencia absoluta entre dos frecuencias acumulativas continuas de observaciones independientes es mayor que un valor crítico, probablemente las distribuciones sean diferentes. Esta prueba es eficaz si el conjunto de datos contiene un elevado número de observaciones.

#### 4.4.2 **Medidas de tendencia central**

Las observaciones tienden a aglutinarse en torno a un valor particular. Las medidas de tendencia central tienen por objeto indicar un valor central en torno al que tienden a agruparse los datos. Las medidas de tendencia central no sustituyen toda la información detallada contenida en el conjunto de observaciones completo. A menudo, el cálculo de una sola medida resulta inadecuado para describir la manera en la que tienden a concentrarse los datos porque no toma en consideración la variación de las observaciones. Cualquier medida de tendencia central debería efectuarse junto con una medida del grado de variación de los valores de las observaciones de las que se deriva la tendencia central.

La media aritmética, denominada comúnmente “promedio”, es una de las estadísticas más frecuentemente utilizadas en climatología. Se calcula dividiendo simplemente la suma de los valores entre el número de valores. En el caso de las observaciones que tiendan a aglutinarse en torno al valor central, la media representa un número hacia el que convergería el promedio de una serie temporal de observaciones muy larga u otros conjuntos de datos de gran volumen a medida que el número de valores de datos vaya aumentando. La media no es representativa de la tendencia central de distribuciones sumamente asimétricas.

Una media ponderada se calcula asignando diferente nivel de importancia a las diferentes observaciones de manera que, por ejemplo, las observaciones más fiables o más representativas tengan una mayor influencia en el cálculo de la media. Existen muchos métodos para determinar las ponderaciones. Un ejemplo común es la ponderación de las distancias, en la que las ponderaciones están inversamente relacionadas con una medida de distancia. Por ejemplo, la ponderación de la distancia se usa a menudo al estimar un valor medio representativo de un lugar concreto a partir de observaciones efectuadas en una región circundante a ese lugar. En general, las ponderaciones son relaciones matemáticas que pueden carecer de relación inherente con los procesos físicos que se miden, pero, siempre que sea posible, en la elección de los métodos de ponderación se debería tratar de tomar en cuenta los principios físicos. Por lo general, los métodos de ponderación dan buen resultado cuando tanto las propiedades físicas como las estadísticas varían continuamente y bastante lentamente en el espacio y el tiempo examinados.

Una media tiene varias ventajas: se trata de un patrón de referencia muy práctico por lo que se refiere a las fluctuaciones de las observaciones (ya que la suma de las desviaciones respecto de una media es cero); se calcula fácilmente; pueden combinarse las medias relativas a diferentes subconjuntos no superpuestos del registro completo de las observaciones, y el error en una estimación de una media a partir de una muestra es menor que otras medidas de la tendencia central (véase la publicación *On the Statistical Analysis of Series of Observations* (WMO-No. 415), sección 3.1, ejemplos 26 y 27).

Sin embargo, las medias presentan limitaciones. Cualquier valor individual puede ser engañoso cuando se utilice para describir una serie de observaciones. Pueden calcularse medias muy semejantes a partir de bases de datos o distribuciones cuya estructura interna es totalmente diferente. Por ejemplo, la media de una distribución bimodal de la nubosidad puede ser la misma que la media de una distribución unimodal, pero la interpretación de ambas medias resultaría muy diferente. La media se ve sumamente afectada por valores excepcionales e inusuales; unas pocas observaciones extremas pueden anular el carácter representativo de la media. Las observaciones que no se agrupan en torno a un valor central no están bien representadas por una media (por ejemplo, la nubosidad, que a menudo tiende a aglutinarse a 0 o bien a 8 octas). Para resultar útil, una media debe transmitir un mensaje válido con respecto a las verdaderas condiciones descritas por el conjunto de datos y no consistir meramente en el resultado de un cálculo matemático.

La mediana es el punto medio de una distribución de frecuencias acumulativas; la mitad de los datos están por encima de la mediana y la otra mitad por debajo. Se calcula ordenando los datos y seleccionando el valor del medio. Si el número de valores es impar, la mediana es el valor del medio. Si el número de valores es par, la mediana se sitúa entre los dos valores del medio, generalmente, como la media (o la media ponderada) de los dos. Si los dos valores del medio son idénticos, se escoge este valor como mediana.

Las variaciones extremas influyen menos en la mediana que en la media porque la mediana es una medida de posición. Puesto que la mediana se basa en el número de observaciones, la magnitud de las observaciones extremas no influye en la mediana. La mediana es especialmente útil cuando las observaciones tienden a agruparse alrededor del centro, pero algunas de las observaciones también son muy altas o muy bajas. Como en el caso de la media, la mediana no representa bien datos que no se agrupan en torno al valor central.

La moda es el valor que aparece con más frecuencia en el conjunto de datos. Al igual que la mediana, la moda es una medida posicional. No se ve afectada ni por el valor (como le ocurre a la media) ni por la posición de otras observaciones (como le ocurre a la mediana). Las modas de muestras pequeñas o de muestras que tienen más de una agrupación de observaciones son estimaciones no fiables de la tendencia central. Si muchas de las concentraciones de las observaciones son verdaderamente típicas (distribución multimodal), es probable que el conjunto de datos esté compuesto por factores diferentes, cada uno de los cuales tiene un valor central diferente en torno al que tienden a agruparse las observaciones.

En el caso de los elementos de carácter circular, como la dirección del viento, el concepto de media puede resultar ambiguo. A menudo, el valor modal, tal como la dirección del viento dominante, es una medida más útil de la tendencia central para elementos que se miden con la dirección.

Una cantidad que tiene una magnitud solamente se denomina escalar. Una cantidad que asocia una dirección con su magnitud se denomina vector. Por ejemplo, la velocidad del viento es un vector puesto que tiene tanto velocidad como dirección. Matemáticamente, un vector puede transformarse en componentes independientes, que pueden promediarse y combinarse en un vector medio resultante. Por ejemplo, el viento puede expresarse como una combinación de dos escalares diferentes, es decir, la velocidad en dirección este y la velocidad en dirección norte, mientras que las velocidades en dirección oeste y en dirección sur, respectivamente, tienen valores negativos. La tendencia central de la velocidad del viento es el vector resultante compuesto por las tendencias centrales de las velocidades del viento hacia el este y hacia el norte. Un vector matemático resultante calculado a partir de datos con direcciones opuestas y velocidades iguales tendrá una magnitud de cero; este cálculo tal vez no sea significativo en el contexto de la descripción del clima. Un método alternativo que tal vez pueda resultar más significativo para las descripciones climáticas es calcular una dirección escalar media, haciendo caso omiso de la velocidad, pero teniendo en cuenta la circularidad (por ejemplo, las velocidades del viento de 355 y 5 grados están separadas por 10 grados y no 350 grados), y una magnitud escalar media haciendo caso omiso de la dirección. Una alternativa consiste en combinar la dirección vectorial resultante con la magnitud escalar media.

En una distribución de frecuencias perfectamente simétrica con una moda, tal como la distribución gaussiana, los valores de la media, la mediana y la moda serán exactamente los mismos. Si la distribución de frecuencias presenta un sesgo hacia los valores elevados (sesgo a la derecha), el valor más alto será el de la media, seguido por el de la mediana y luego el de la moda. Esta secuencia se invierte si la distribución de la frecuencia presenta un sesgo hacia los valores bajos (sesgo a la izquierda). Estas relaciones (figura 4.15) y las características de las medidas (tabla 4.1) deberían tenerse en cuenta siempre que se escoja una medida de tendencia central para representar un conjunto de datos.



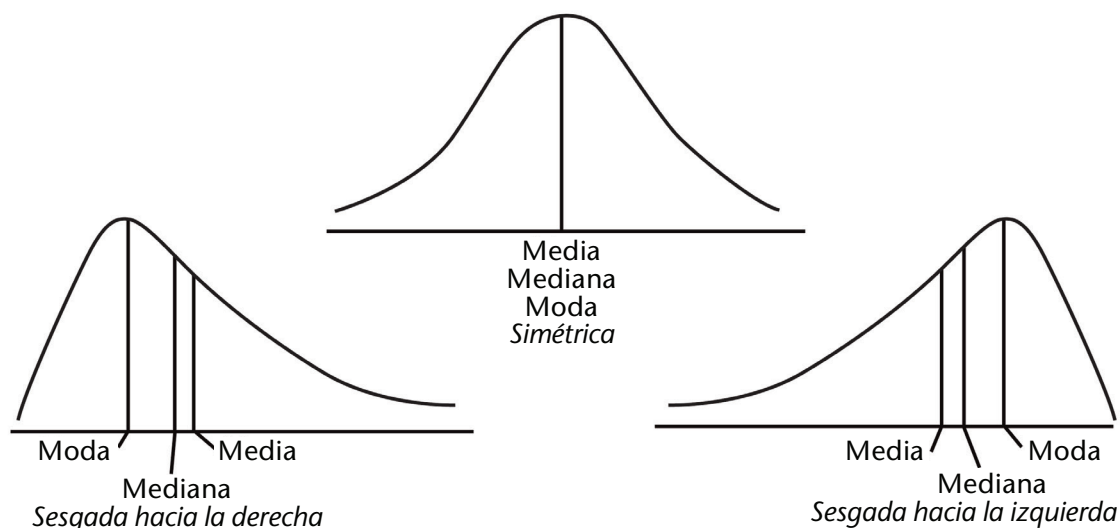


Figura 4.15. Relaciones entre la media, la mediana y la moda

Tabla 4.1 Comparación entre algunas características de las medidas de tendencias centrales

| Característica                                                                                                         | Media        | Mediana                           | Moda                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Afectada por datos anómalos                                                                                            | Sí           | No                                | No                              |
| Representativa de la tendencia central cuando las distribuciones de frecuencias están poco dispersadas                 | Sí           | Sí                                | Sí                              |
| Representativa de la tendencia central cuando las distribuciones de frecuencias están ampliamente dispersadas          | No           | Tal vez                           | No                              |
| Representativa de la tendencia central cuando las observaciones están conglomeradas en más de un grupo                 | No           | Tal vez                           | No                              |
| Representativa de una tendencia central cuando las distribuciones de frecuencias con una agrupación presentan un sesgo | No           | Sí                                | Sí                              |
| Facilidad de cálculo                                                                                                   | La más fácil | Fácil a partir de datos ordenados | Fácil a partir de un histograma |
| Desviaciones iguales a cero                                                                                            | Sí           | No siempre                        | No siempre                      |
| Posibilidad de más de 1                                                                                                | No           | No                                | Sí                              |
| Indicador de variabilidad                                                                                              | No           | No                                | Solo si hay más de una moda     |

#### 4.4.3 Medidas de variabilidad

Una vez que se escoja una estimación adecuada de la tendencia central, es posible medir la variabilidad de las observaciones individuales en torno a ese valor. La importancia de la medición de la variación y su explicación es fundamental. Sin embargo, un registro de tan solo unas pocas observaciones es insuficiente para estimar la variabilidad.

La variabilidad puede medirse en términos absolutos o relativos. Es posible reducir la desviación de cada observación respecto de la tendencia central a un valor que representa y permite describir el conjunto de datos en su totalidad. Ese único número es la variabilidad absoluta.

La medida más simple de la variabilidad absoluta es el rango de observaciones. El rango es la diferencia existente entre los valores más altos y los valores más bajos. Aunque sea fácil de calcular, el rango presenta muchas limitaciones. Si los valores extremos son muy escasos o no forman parte del grueso de las observaciones, el rango puede resultar engañoso. El rango no ofrece información sobre el carácter de la distribución de frecuencias dentro de los límites extremos. Además, prescinde casi completamente del grado de concentración de los valores, y no caracteriza íntegramente el conjunto de datos de una manera útil. Tampoco es suficiente para estimar la fiabilidad de la tendencia central.

El alcance intercuartil es otra forma común de medir la variabilidad absoluta. Constituye la diferencia entre el tercer y el primer cuartil. El primer cuartil es el valor de las observaciones ordenadas de tal manera que un 25 % es inferior y un 75 % superior a dicho valor, y el tercer cuartil es el valor de los datos ordenados de tal manera que el 75 % es inferior y el 25 % superior a dicho valor. El alcance intercuartil es, pues, el alcance del 50 % central de las observaciones ordenadas. Al utilizarlo junto con la mediana, indica algunas de las características de la distribución de frecuencias. También es posible calcular otros alcances centrales de manera similar. El alcance interdecil, por ejemplo, es la diferencia entre el nonagésimo y el décimo percentil y es el alcance del 80 % central de las observaciones.

La desviación media es la media del valor absoluto de todas las desviaciones de las distintas observaciones respecto de la medida de tendencia central escogida. Si bien es posible calcular las desviaciones a partir de la media, la mediana o la moda, en principio, deberían calcularse a partir de la mediana, puesto que la suma de las desviaciones absolutas respecto de la mediana es menor o igual que la suma de la media o de la moda.

La desviación típica es la raíz cuadrada de la media del cuadrado de todas las distintas desviaciones respecto de la media. Las desviaciones se toman a partir de la media en vez de la mediana o de la moda debido a que la suma de los cuadrados de la media es un mínimo. Si las desviaciones se elevan al cuadrado, hay una mayor ponderación de las variaciones extremas. La desviación típica se utiliza para deducir muchas medidas estadísticas. También se usa ampliamente como cantidad normativa para normalizar diferentes distribuciones con el fin de establecer comparaciones.

Por lo que respecta a las comparaciones, las medidas absolutas de la variabilidad pueden presentar grandes limitaciones. Las comparaciones deberían hacerse solo si los promedios respecto de los que se han medido las desviaciones tienen un valor aproximadamente igual y cuando las unidades de medición sean las mismas. Por ejemplo, es irrelevante comparar desviaciones típicas calculadas respecto de un conjunto de datos sobre la temperatura y de un conjunto de datos sobre grados-día de calefacción.

A menudo, se requieren comparaciones cuando las medias no son aproximadamente iguales o cuando las unidades de medición no son las mismas. Por lo tanto, se necesita alguna medida que tenga en cuenta la media respecto de las que se han medido las desviaciones y que reduzca las diferentes unidades de medición a una base común con el fin de hacer comparaciones. La relación de la variabilidad absoluta con la magnitud de la tendencia central es la variabilidad relativa. Una de esas medidas es el coeficiente de variación, que es la relación entre la desviación típica y la media de un conjunto de datos.

#### 4.4.4 **Medida de la simetría**

La asimetría es una medida de la desviación respecto de la simetría. Es una medida relativa y adimensional, por lo que permite establecer comparaciones entre conjuntos de datos. Una medida simple de la asimetría consiste en la diferencia entre la media y la moda, dividida entre

la desviación típica. La asimetría es positiva cuando la media es mayor que la moda y negativa cuando la moda es mayor que la media. También se han determinado otras medidas, como una basada en el alcance intercuartil y la mediana.

La asimetría positiva es característica de algunos conjuntos de datos sobre la precipitación que tienen un límite inferior de cero, pero un límite superior ilimitado. Los conjuntos de datos relativos a la temperatura máxima diaria también suelen presentar una tendencia hacia la asimetría positiva, pero las temperaturas mínimas diarias a menudo presentan una tendencia hacia la asimetría negativa.

#### 4.4.5 **Medida del apuntamiento**

Es posible que las distribuciones de frecuencias simétricas tengan diferentes grados de aplastamiento en su parte central. La curtosis es un coeficiente adimensional que proporciona una medida relativa para hacer comparaciones del aplanamiento o apuntamiento. La curtosis positiva indica un máximo limitado en el centro de la distribución de frecuencias y las frecuencias caen pronunciadamente hasta valores bajos lejos de la media. Los valores negativos indican una región central plana y amplia y son característicos de muchas distribuciones meteorológicas, como la humedad en altitud.

#### 4.4.6 **Índices**

Un índice tiene por objeto reducir condiciones complejas a un solo número que conserva cierto significado físico y puede utilizarse para el seguimiento de un determinado proceso. Expresa la relación entre las condiciones observadas y las de referencia mediante un solo valor. La referencia suele ser normalmente, pero no siempre, el estado medio del clima. Ejemplo de ello es el índice de gravedad de la sequía de Palmer, que es una comparación sumaria de un complejo sistema de balance hídrico de precipitación, evaporación, escorrentía, recarga y propiedades del suelo con condiciones medias del clima. El desarrollo de un índice consta de cuatro componentes: la elección de los elementos que deben incluirse en el índice; la elección y el cálculo de la referencia; el método de elaboración del índice, y las ponderaciones o la importancia de cada uno de los elementos incluidos.

A menudo, examinar y elegir los datos que se deben incluir en el índice resulta más complicado que el cálculo del índice en sí. Una de las preocupaciones que supone la elección de la referencia es que las características de las observaciones utilizadas para definirla pueden cambiar a lo largo del tiempo; es fundamental que las observaciones utilizadas sean homogéneas (véase la sección 5.2). Otra preocupación es que la referencia debería representar condiciones normales, habituales o esperadas, ya que la mayoría de los usuarios de un índice suponen que la referencia representa dichas condiciones. Al elegir la referencia, se debería tener buen cuidado de definir explícitamente lo que se va a comparar y con qué finalidad.

Es fundamental tener en cuenta la elección de las ponderaciones. La importancia de cada elemento que interviene en el índice debería ponderarse con respecto a la finalidad del cálculo del mismo. Si el índice se ha de calcular en el futuro, deberá prestarse especial atención al examen periódico de la contribución de cada elemento a los cambios en, por ejemplo, la importancia, la exactitud de los datos, la medición y el proceso.

Existen otros índices creados específicamente para evaluar los cambios en el clima a partir de las observaciones. Estos índices se conocen como índices de cambio climático (véase la publicación *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation* (WCDMP-No. 72, WMO/TD No. 1500)).

## 4.5 CORRELACIÓN

A menudo, es necesario detectar o especificar la relación entre dos o más elementos. Una relación puede resultar evidente al visualizar los datos, mientras que las medidas cuantitativas suelen ser producto de un cálculo. La correlación es una medida que cuantifica una relación. Independientemente de cuál sea la medida calculada, es importante observar que la correlación no implica una relación de causa a efecto, sino solamente que los elementos tienen un comportamiento similar. Con frecuencia, la relación observada puede atribuirse a factores que no son los que se están examinando; muchas relaciones aparentes que se establecen en la meteorología y la climatología son, por lo general, demasiado complejas para atribuir las a una sola causa. Al igual que una correlación positiva o negativa no implica una causalidad, una correlación cero no supone necesariamente la ausencia de una relación de causalidad.

### 4.5.1 Tablas de contingencia

Las tablas de contingencia son una manera simple pero eficaz de descubrir relaciones importantes entre los factores, especialmente en los conjuntos de datos de gran volumen. La mayoría de las veces, dichas tablas constan de descriptores cualitativos (tales como leve, moderado o fuerte) o de variables dicotómicas (un fenómeno se produjo o no se produjo). También pueden estar formadas por la frecuencia conjunta de dos elementos, tales como la velocidad y la dirección del viento o la distribución diurna de la visibilidad. La tabla 4.2 es un ejemplo de una tabla de contingencia.

**Tabla 4.2. Tabla de contingencia de accidentes en carreteras y observaciones de visibilidad**

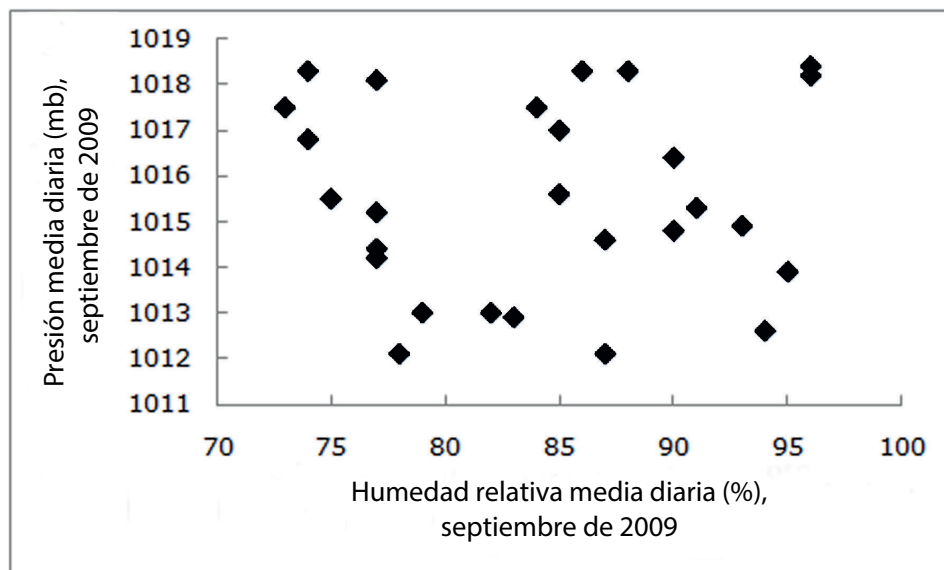
|                         | <i>Visibilidad inferior a 200 metros</i> | <i>Visibilidad superior a 200 metros</i> | <i>Total</i> |
|-------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|--------------|
| Se produjo un accidente | 16                                       | 4                                        | 20           |
| Ausencia de accidentes  | 13                                       | 332                                      | 345          |
| Total                   | 29                                       | 336                                      | 365          |

La independencia de los elementos de una tabla de contingencia suele evaluarse con una prueba de chi-cuadrado. Cuando se hace esta prueba, la dependencia serial que frecuentemente se encuentra en las series temporales climatológicas, según las cuales es más probable que una observación se asemeje a la observación que la precede que difiera de ella (véase la sección 4.6), no cumple los supuestos de la prueba, de modo que las conclusiones a las que esta lleva pueden ser sospechosas.

### 4.5.2 Medidas de correlación

Un diagrama de dispersión es otra herramienta simple y útil para visualizar las relaciones. Dicho diagrama puede mostrar la relación entre dos elementos o la tendencia de un elemento a lo largo del tiempo, o si es que existe alguna relación útil. Las figuras 4.16 y 4.17 son ejemplos de diagramas de dispersión. A veces, la relación entre los elementos y la evolución en el tiempo puede resumirse mediante una medida de correlación. El coeficiente de correlación es la medida de relación usada más comúnmente. A veces, se utiliza también otra medida: la correlación por rangos de Spearman.

El coeficiente de correlación es un número entre -1 y +1 y mide la relación lineal existente entre dos elementos. Un coeficiente cero implica que no hay similitud de comportamiento entre los elementos. La figura 4.16 es un ejemplo de la configuración previsible cuando la correlación entre dos elementos es muy débil. Un coeficiente +1 indica que, cuando el valor de un elemento aumenta, el valor del otro elemento también lo hace en proporción directa. La figura 4.17 es un



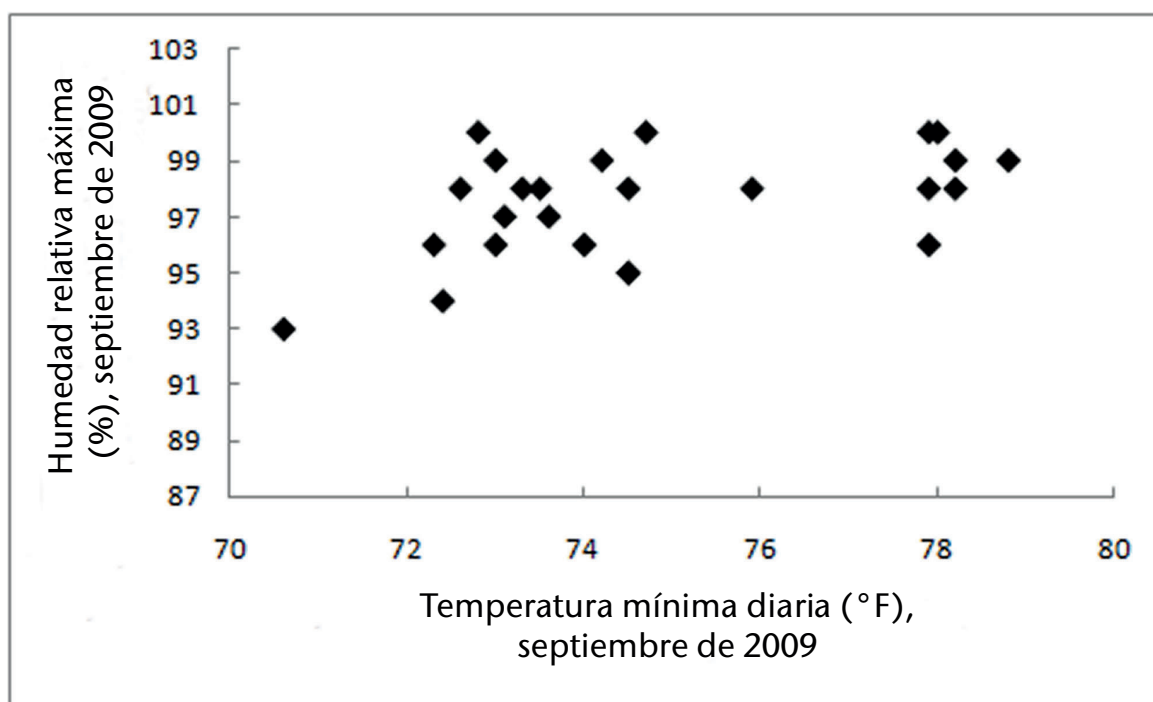
**Figura 4.16. Diagrama de dispersión con una correlación débil**

ejemplo de la configuración esperada cuando dos elementos tienen una estrecha correlación positiva. Un coeficiente  $-1$  indica que, cuando el valor del primer elemento aumenta, el valor del otro elemento disminuye en proporción inversa. Uno de los problemas que supone el uso de un coeficiente de correlación simple es que la relación implícita es lineal. A menudo, los elementos meteorológicos están relacionados de una manera no lineal y tal vez sea necesario transformar el conjunto de datos (véase la sección 5.4) antes de calcular un coeficiente de correlación.

La correlación por rangos de Spearman mide la concordancia entre los rangos ordenados de dos conjuntos de datos. La medida es una vez más un número entre  $-1$  y  $+1$ . Si las observaciones de ambos conjuntos no mantienen el mismo orden relativo, la medida tendrá un coeficiente bajo o negativo; si tienen un orden relativo similar, el coeficiente será alto y positivo. La medida de Spearman es menos sensible a los extremos que el coeficiente de correlación; mide la relación lineal y, a veces, indica una relación no lineal.

#### 4.6 SERIES TEMPORALES

Las observaciones ordenadas según la secuencia en que se efectuaron constituyen una serie temporal (figura 4.18). Un gráfico de valores de datos trazado en función del tiempo es una importante herramienta cualitativa para determinar variaciones relacionadas con el tiempo. En la climatología, una tendencia es una característica interesante porque constituye un resumen del comportamiento histórico de las observaciones de un elemento. En la mayoría de los casos, se examinan las tendencias lineales de una serie temporal determinada, pero, a veces, puede ser mejor describir una tendencia en términos no lineales, como una curva, o incluso un desplazamiento abrupto hacia arriba o hacia abajo. Por lo general, las tendencias, ya sean lineales o no, se mantienen en las series climáticas durante un período finito, que puede ser bastante largo. A lo largo del tiempo, en el sistema climático se han observado frecuentemente tendencias con una orientación, que, finalmente, acaba por invertirse. Lo que podría parecer una tendencia sostenida durante el período más reciente de un registro climático podría formar parte de una oscilación lenta relacionada con variaciones multidecenales que no pueden apreciarse claramente debido a que el intervalo de tiempo de dicha tendencia sostenida es solo una parte de la oscilación total, o porque se desconoce la naturaleza de la serie proyectada para el futuro. El cambio climático antropogénico plantea un desafío particularmente difícil a este respecto dado que probablemente las decisiones humanas influyan a la hora de determinar, por ejemplo, cuánto tiempo se mantendrá la tendencia al calentamiento mundial observada durante el siglo pasado. Para hacer un estudio completo de las series temporales, es necesario determinar no solo las tendencias, sino también las oscilaciones periódicas o cuasiperiódicas, así como las



**Figura 4.17. Diagrama de dispersión con una correlación positiva fuerte**

variaciones irregulares o aparentemente fortuitas que se observan en los datos. La finalidad de los análisis de las series temporales es comprender la manera en la que la variabilidad de una serie temporal se distribuye como función de la escala temporal.

Normalmente en el ámbito de la meteorología y la climatología, las observaciones sucesivas tienden más a asemejarse que a diferenciarse. La medida utilizada para resumir la relación entre cada observación y la que le precede constituye el coeficiente de autocorrelación. Esta medida se calcula de la misma manera que el coeficiente de correlación (véase la sección 4.5.2), con la excepción de que la segunda serie es la misma que la primera, pero con un desplazamiento de uno o más saltos de tiempo.

Las medidas que resumen las tendencias dependen del tipo de tendencia que se está determinando. Las tendencias lineales están representadas por la pendiente de una línea recta, mientras que las no lineales están representadas por los coeficientes de las variables matemáticas que definen la ecuación relativa al ajuste de curvas, como los coeficientes de una función polinómica. Del mismo modo, las características periódicas también están representadas por los coeficientes de las variables matemáticas que definen las oscilaciones, tales como la frecuencia, la fase y la amplitud de las funciones trigonométricas.

#### 4.7 INTERPRETACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS SUMARIAS DEL CLIMA

Si bien es posible calcular muchas medidas de resumen, tal vez no sea adecuado utilizarlas para describir la base de datos. Todas las medidas que reducen observaciones con el fin de detectar e indicar una señal o relación climática se basan en supuestos y, si estos no son válidos, las medidas de resumen pueden resultar engañosas. Hay cuatro aspectos que deben examinarse detalladamente antes de usar medidas de resumen, a saber: los errores del conjunto de datos, la falta de homogeneidad, la independencia de las observaciones y la desatención de los factores importantes.

A menudo, los datos son erróneos debido a errores de registro (tales como la transposición de números), las comunicaciones ininteligibles, los malentendidos de un observador respecto de las prácticas de codificación, errores de proceso (por ejemplo, la conversión incorrecta de grados

Fahrenheit a grados Celsius), errores de codificación y lógica de los programas informáticos, e información incorrecta del identificador (ubicación u hora) de un valor. Estos tipos de error (véanse las secciones 3.3.3 y 3.4) no guardan relación con las condiciones físicas que son objeto de observación y pueden contaminar los datos, de tal manera que los análisis de estos pueden llevar a conclusiones incorrectas.

Con frecuencia, se incurre en deducciones incorrectas cuando se emplean medidas cuantitativas para comparar datos que realmente no son comparables, como cuando se comparan observaciones no homogéneas. De ser posible, cualquier conjunto de datos que se esté analizando debe homogeneizarse (véase la sección 5.2).

Muchos conjuntos de datos meteorológicos no cumplen el supuesto de independencia. Antes de resumir un conjunto de datos, si es posible, debería velarse por eliminar la dependencia existente entre las observaciones. Por ejemplo, el efecto de los ciclos anuales conocidos puede eliminarse notablemente si se resumen las desviaciones respecto del ciclo conocido. También a modo de ejemplo, si se sabe que la persistencia (autocorrelación) afecta a una serie de observaciones, como a veces ocurre con las temperaturas diarias observadas durante un fenómeno sinóptico de alta presión en superficie, el modelo analítico debería tenerlo en cuenta. Si los modelos no dan cuenta de la dependencia, la persistencia que afecta a todas las observaciones efectuadas durante el fenómeno persistente podría eliminarse mediante un submuestreo en el que se escoja solo una observación entre varias de las disponibles durante el fenómeno. Sin embargo, en este proceso debería tenerse cuidado de no ocultar ninguna oscilación subyacente, lo que puede conducir a un análisis incorrecto.

El presentar pruebas cuantitativas relativas a un solo factor haciendo caso omiso de otros factores importantes puede dar lugar a una explicación incompleta o errónea. Un ejemplo de ello es la comparación de las temperaturas registradas durante una estación fría en una localidad costera y en una localidad continental. Los promedios pueden ser suficientemente parecidos como para indicar que los climas de esos lugares son iguales, pero, si se tuviera en cuenta la mayor variabilidad que se produce en la localidad continental, no se llegaría a semejante conclusión.

Determinados supuestos estadísticos relativos, por ejemplo, a la coherencia y homogeneidad de los datos o al carácter de la dependencia existente entre las observaciones, se hallan implícitos en todas las técnicas estadísticas. El analista debería distinguir claramente y evaluar estos supuestos, y la interpretación de la medida de resumen debería moderarse según la proporción en la que se cumplan los supuestos. Si se incumple alguno, debería modificarse la interpretación de la medida de resumen para dar cuenta de ello. Puede que efectivamente baste con la interpretación habitual de la medida, pero deberían darse a conocer los incumplimientos reales o hipotéticos junto con la medida en cuestión. Por ejemplo, si las temperaturas medias anuales

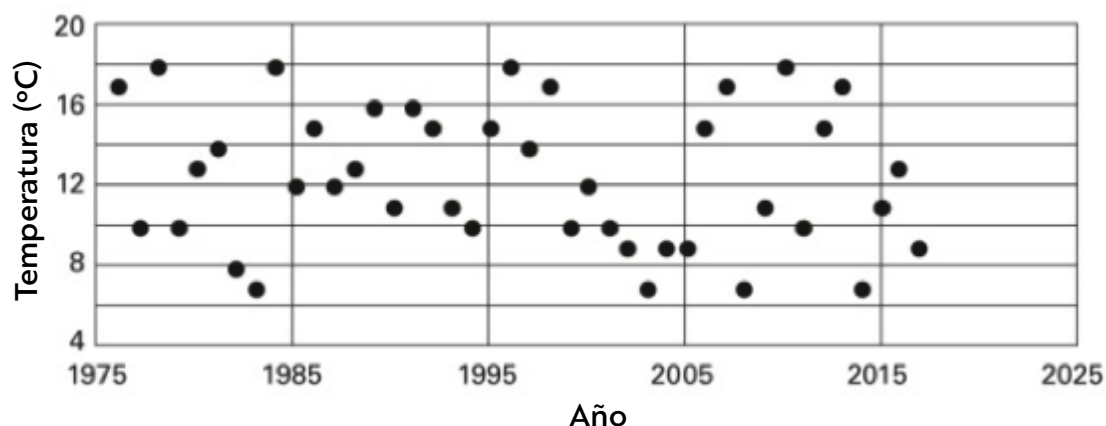


Figura 4.18. Serie temporal de la temperatura media de marzo



se calculan utilizando una base de datos cuyos metadatos indiquen que no es homogénea, se incumple el supuesto de que todos los datos son comparables. Será necesario, pues, indicar este incumplimiento y el efecto del mismo en el cálculo de la media.

#### 4.8 NORMALES

El uso de las normales climáticas tiene dos finalidades principales. Sirven de referencia para poder comparar las observaciones recientes o presentes y, en particular, para fundamentar muchos conjuntos de datos climáticos basados en anomalías (por ejemplo, las temperaturas medias mundiales). También tienen un uso generalizado, implícito o explícito, para predecir las condiciones que muy probablemente se experimentarán en un lugar dado.

Las prácticas históricas referentes a las normales climáticas (indicadas en ediciones anteriores de la presente Guía, el *Reglamento Técnico* (OMM-N° 49), Volumen I, Definiciones, y el *Manual sobre la preparación de informes CLIMAT y CLIMAT TEMP* (OMM/DT-N° 1188), 1.2.3) se remontan a la primera mitad del siglo XX. La recomendación que generalmente se hacía era tomar como referencia períodos de 30 años. La referencia de un período de 30 años se estableció como norma sobre todo porque la primera vez que se hizo la recomendación solo se disponía de datos correspondientes a 30 años que pudieran resumirse. En un principio, el objetivo de las normales consistía en permitir comparar las observaciones de todo el mundo. El uso de las normales para la predicción fue cobrando impulso lentamente en el transcurso del siglo XX.

Tradicionalmente, las normales climatológicas se han centrado en el valor medio de un elemento climático durante un período de tiempo. Como se indica en 4.4.2, la media ofrece una descripción incompleta del clima, y en muchas aplicaciones se requiere información sobre otros aspectos de la distribución de frecuencias y el comportamiento estadístico de ese elemento, tales como la frecuencia de períodos extensos en los que el valor supera un umbral. Los valores extremos de un elemento observado durante un período dado, así como otros descriptores estadísticos de la distribución de frecuencias de un elemento (como la desviación típica de los valores diarios o mensuales), son descriptores útiles del clima de un lugar y deberían incorporarse a los conjuntos de datos de las normales.

Muchos SMHN calculan normales diarias junto con normales mensuales y anuales. Aunque no sean un requisito de la OMM, las normales diarias ilustran la evolución no aleatoria de las variaciones diarias de un elemento que no puede ser captada mediante normales mensuales. Se calculan promediando los valores de un elemento de una fecha específica del calendario durante cierto período de tiempo. Por lo general, los valores observados son objeto de un suavizamiento con medias móviles de tres a siete días o un suavizamiento binomial para así reducir los efectos de la variabilidad temporal aleatoria de alta frecuencia de los sistemas meteorológicos. Otro método de suavizamiento consiste en ajustar las series de promedios diarios calculados a partir de las observaciones con funciones de suavizado mediante *splines*, trigonométricas o polinómicas; una vez suavizadas, dichas series se convierten en las normales diarias (véase la sección 5.8).

##### 4.8.1 Período de cálculo

Para la evaluación de la variabilidad del clima a largo plazo y el seguimiento del cambio climático se necesita un período de referencia relativamente estable. Históricamente, las normales climatológicas estándares se calculaban cada 30 años por períodos de 30 años (1901 a 1930, 1931 a 1960, 1961 a 1990, etc.). Para el objetivo concreto de vigilar el clima a largo plazo, las normales calculadas para el período comprendido entre el 1 de enero de 1961 y el 31 de diciembre de 1990 se consideran un período de referencia estable de la OMM, que debería mantenerse indefinidamente o hasta que exista un motivo científico de peso para cambiarlo.

No obstante, en el contexto de un clima cambiante se necesitan también cálculos más frecuentes de las normales climáticas. Por ejemplo, se han calculado conjuntos de datos de temperatura mundiales como anomalías desde el período de referencia de 1961 a 1990. El uso de un

período de promediación más reciente, como el de 1981 a 2010 (véase la figura 4.19), mejora la "exactitud predictiva" respecto de elementos que muestran una tendencia secular (es decir, cuando los valores de la serie temporal muestran un aumento y descenso sistemático en sus mediciones a largo plazo). Además, muchos usuarios podrían considerar las normales de 1981 a 2010 más "actuales" que las de 1961 a 1990. Las normales climatológicas estándares se calculan cada 10 años por períodos de 30 años al principio de cada década, a partir del año que termina en el dígito 1 (1981 a 2010, 1991 a 2020, etc.). La realización de un nuevo cálculo de las normales cada 10 años requiere también volver a calcular numerosos conjuntos de datos que utilizan las normales como referencia (grados-día, desviaciones de los valores normales, etc.). La informática moderna y los sistemas de bases de datos cada vez más perfeccionados deberían contribuir a que estos cálculos resulten relativamente fáciles.

Según varios estudios, 30 años no suelen constituir un período de promediación óptimo para las normales utilizadas en proyecciones futuras. A menudo, el período óptimo para las temperaturas es mucho más corto que 30 años, pero, con frecuencia, el período óptimo para la precipitación excede ampliamente los 30 años. El documento *The Role of Climatological Normals in a Changing Climate* (WMO/ TD-No. 1377) y otras referencias que figuran al final del presente capítulo ofrecen mucha información detallada sobre el uso predictivo de las normales de varios elementos. Para fines predictivos, se alienta a los SMHN a que preparen promedios y medias de un período. La duración óptima del registro relativo al uso predictivo de las normales varía en función del elemento, la geografía y la tendencia secular. En general, el período de registro más reciente que abarque de 5 a 10 años tiene tanto valor predictivo como un registro de 30 años. Los períodos más cortos suelen permitir el cálculo de las normales para una gama mucho más amplia de estaciones que los períodos de normales estándares. En el caso de los elementos que muestran una importante tendencia subyacente (como la temperatura media), la exactitud predictiva mejora al actualizar frecuentemente los promedios y las medias de un período.

En cualquier publicación sobre períodos de referencia, normales y promedios, así como en cualquier publicación en que estos se utilicen para el análisis y la presentación de la variabilidad del clima, es importante documentar el período considerado para efectuar el cálculo y los métodos de cálculo.

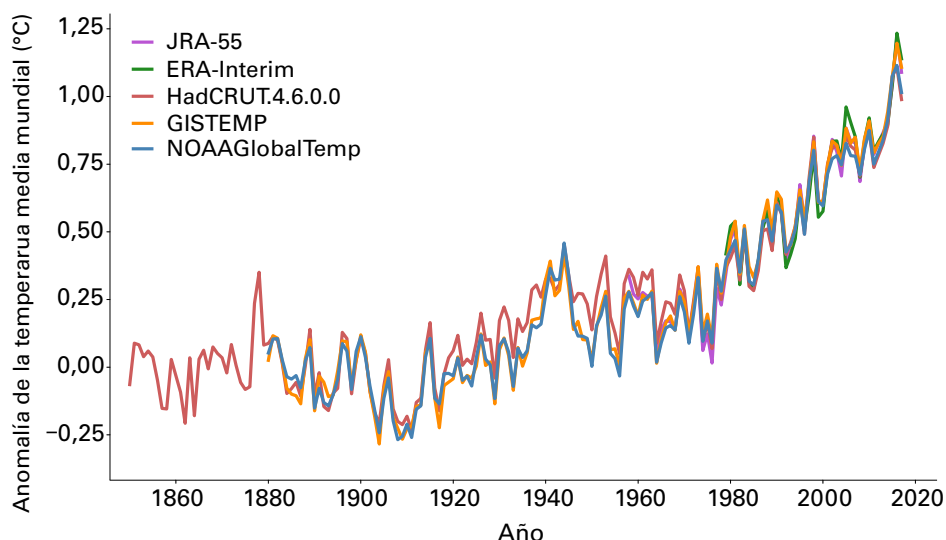
#### 4.8.2 Estaciones para las que se calculan normales y promedios

Las normales y los promedios del clima deberían calcularse para una gama de estaciones tan amplia como sea posible, a condición de que las estaciones cumplan las normas relativas al volumen y completitud de los datos disponibles. De ser posible, deberían calcularse, como mínimo, para todas las estaciones cuyos datos se distribuyen por el Sistema Mundial de Telecomunicación (véase el *Manual del Sistema Mundial de Telecomunicación* (OMM-Nº 386), adjunto I-3, 2.1c), y adjunto I-5, 4.1e) y tabla D, 3.1a)).

#### 4.8.3 Homogeneidad de los datos

En la medida de lo posible, los datos utilizados para calcular las normales y los promedios climáticos deberían ser homogéneos. El tema de la homogeneidad se aborda más detalladamente en 5.2. En el contexto de las normales y los promedios del clima, los aspectos sobre la homogeneidad que requieren especial atención son los cambios de emplazamiento; los cambios en el procedimiento de observación, en particular, en la hora de observación; los cambios en los tipos de instrumentos; los cambios en la exposición de los instrumentos a lo largo del tiempo, y los cambios en el proceso de datos.

En la práctica, son muchos los lugares en los que no será posible establecer un conjunto de datos con la homogeneidad adecuada. En lugar de ello, será necesario elaborar normales a partir de una combinación de dos o más partes de un registro no homogéneo. Una opción posible consiste en introducir ajustes en la parte más antigua de un registro para hacerlo lo más homogéneo posible con los datos más recientes.



**Figura 4.19. Anomalías de la temperatura media mundial, con respecto al período de referencia de 1850 a 1900 para los cinco conjuntos de datos mundiales (por cortesía del Centro Hadley de la Oficina Meteorológica del Reino Unido)**

#### 4.8.4 Datos faltantes

Las normales que se calculan sobre la base de conjuntos de datos incompletos pueden estar distorsionadas. Por ejemplo, si durante un determinado período, un año fue particularmente frío, una normal calculada sin datos de ese año sería superior a una normal en la que sí se tomó en cuenta ese año. Como suele haber bastante autocorrelación en los datos climatológicos, la falta consecutiva de observaciones puede tener una mayor repercusión en las normales que la falta del mismo número de observaciones repartidas aleatoriamente durante el período en cuestión.

A modo de orientación, las normales o medias de un período deberían calcularse solo cuando estén disponibles los valores de al menos un 80 % de los años registrados y no falten los valores de más de tres años consecutivos. Si tras un período prolongado sin datos se dispone de un conjunto de datos bastante completo, puede optarse por calcular una media de período utilizando solo datos correspondientes a los años posteriores a la interrupción del registro.

Las normales o promedios anuales deberían calcularse como la media o la suma (según proceda) de las 12 normales o promedios mensuales, sin tener en cuenta la diferente duración de los meses (véase la publicación *Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas* (OMM-Nº 1203), 4.4). En el cálculo de las normales anuales no pueden faltar las normales de ningún mes.

Se recomienda no calcular un valor mensual si faltan más de diez valores diarios o cinco o más valores diarios consecutivos. En el caso de elementos en los que el valor mensual es la suma de los valores diarios en lugar de un valor medio (por ejemplo, la lluvia o la insolación), un valor mensual solo debería calcularse si se dispone de todas las observaciones diarias o si se incorporan todos los días en los que falten datos en una observación que incluya el período de los datos ausentes en el día en el que se reinician las observaciones. En el documento *Calculation of Monthly and Annual 30-Year Standard Normals* (WMO/TD-No. 341) se recomiendan criterios más estrictos para calcular los promedios, no pudiendo superar más de cinco días con datos faltantes en total o más de tres días consecutivos con datos faltantes.

#### 4.8.5 Temperatura media diaria

Existen muchos métodos para calcular la temperatura media diaria. Entre ellos, cabe citar los que emplean una máxima y una mínima diarias, observaciones efectuadas 24 horas al día,

observaciones sinópticas y observaciones a determinadas horas a lo largo del día. La mejor aproximación estadística de una media se consigue mediante la integración de observaciones continuas realizadas durante un período de tiempo; cuanto más frecuentes sean las observaciones, más exacta será la media obtenida. Por lo general, las consideraciones prácticas imposibilitan el cálculo de una media diaria a partir de numerosas observaciones distribuidas uniformemente durante un período de 24 horas debido a que muchos emplazamientos de observación no miden un elemento continuamente. Para efectuar las comparaciones conviene utilizar un método de proceso normalizado para todas las estaciones del mundo y en el máximo número de estaciones.

Todas las estaciones climatológicas ordinarias observan una temperatura máxima y mínima diaria (véase la sección 2.2.1). Por lo tanto, el método que se recomienda para calcular la temperatura media diaria es utilizar la media de las temperaturas máxima y mínima diarias. Si bien este método no constituye la mejor aproximación estadística, su uso sistemático permite lograr el objetivo comparativo de las normales. Un SMHN debería también calcular las medias diarias utilizando otros métodos si ello permite comprender mejor el clima del país.

#### 4.8.6 Quintiles de precipitación

Los quintiles de precipitación se utilizan para establecer una relación entre un total de precipitación mensual observada y la distribución de frecuencias de valores observada durante el período considerado para calcular las normales. No existe un método aceptado universalmente para calcular los límites de los quintiles, y la elección del método puede influir notablemente en los valores obtenidos. Sin embargo, el procedimiento que se recomienda para calcular los límites es el que se especifica a continuación.

- a) Para cada mes, los 30 valores mensuales de la precipitación registrados durante el período normal de 30 años se indican en una lista en orden ascendente. Posteriormente, la lista se divide en cinco grupos de quintiles de seis valores cada uno. El primer quintil contiene los seis valores menores del mes en cuestión que se han observado durante el período de 30 años, el segundo quintil los seis valores menores siguientes, y así sucesivamente hasta el quinto quintil, que contiene los seis valores más altos.
- b) El límite entre dos quintiles adyacentes se calcula como el promedio entre el valor máximo de un quintil y el primer valor del siguiente. El índice de quintiles es el número del quintil más bajo que contiene la precipitación mensual en el mes considerado en el informe que se prepara, con las siguientes reglas especiales:
  - i) si la precipitación es 0: utilícese el índice 0 si tal caso no ha ocurrido durante el período de referencia; utilícese 1 si ha ocurrido menos de 6 veces; utilícese 2 si ha ocurrido entre 7 y 12 veces; utilícese 3 si ha ocurrido entre 13 y 18 veces, y así sucesivamente;
  - ii) si la precipitación es menor que cualquier valor registrado durante el período de referencia: utilícese el índice 0 (independientemente de si la precipitación es 0), y
  - iii) si la precipitación es mayor que cualquier valor registrado durante el período de referencia: utilícese el índice 6.

## REFERENCIAS

- Organización Meteorológica Mundial, 1989: *Calculation of Monthly and Annual 30-Year Standard Normals* (WMO/TD-No. 341, WCDP-No. 10). Ginebra.
- , 1990: *On the Statistical Analysis of Series of Observations* (WMO-No. 415). Ginebra.
- , 2004: *Manual sobre la preparación de informes Climat y Climat TEMP* (OMM/TD-Nº 1188). Ginebra.
- , 2007: *The Role of Climatological Normals in a Changing Climate* (WMO/TD-No. 1377, CDMP-No. 61). Ginebra.
- , 2009: *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation* (WCDMP-No. 72, WMO/TD No.1500). Ginebra.
- , 2015: *Reglamento Técnico (OMM-Nº 49), Volumen I: Normas meteorológicas de carácter general y normas recomendadas*. Ginebra.
- , 2015: *Manual del Sistema Mundial de Telecomunicación* (OMM-Nº 386). Ginebra.
- , 2017: *Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas* (OMM-Nº 1203). Ginebra.

## LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- Angel, J.R., W.R. Easterling y S.W. Kirtsch, 1993: "Towards defining appropriate averaging periods for climate normal", en *Climatological Bulletin*, 27:29–44.
- Asnani, G.C., 1993: *Tropical Meteorology* (2 vols.). Pune, Sind Society.
- Barnston, A.G. y R.E. Livezey, 1987: "Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns", en *Monthly Weather Review*, 115:1083–1126.
- Bhalme, H.N. y D.A. Mooley, 1980: "Large-scale droughts/floods and monsoon circulation", en *Monthly Weather Review*, 108:1197–1211.
- Bhalme, H.N., D.A. Mooley y S.K. Jadhav, 1984: "Large-scale April pressure index connected with the southern oscillation and its potential for prediction of large-scale droughts over India", en *Mausam*, 35(3):355–360.
- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett y P.D. Jones, 2006: "Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850", en *Journal of Geophysical Research* 111, D12106.
- Dixon, K.W. y M.D. Shulman, 1984: "A statistical evaluation of the predictive abilities of climatic averages", en *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23:1542–1552.
- Guttman, N.B., 1989: "Statistical descriptors of climate", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 70:602–607.
- Huang, J., H.M. van den Dool y A.G. Barnston, 1996: "Long-lead seasonal temperature prediction using optimal climate normal", en *Journal of Climate*, 9:809–817.
- Lamb, P.J. y S.A. Changnon, 1981: "On the 'best' temperature and precipitation normals: the Illinois situation", en *Journal of Applied Meteorology*, 20:1383–1390.
- Matheron, G., 1973: "The intrinsic random functions and their applications", en *Advances in Applied Probability*, 5:207–221.
- Rao, G.A., S.V. Datar y H.N. Srivastava, 1992: "Study of drought indices in relation to rice crop production over some States of India", en *Mausam*, 43(2):169–174.
- Srivastava, A.K., P. Guhathakurta y S.R. Kshirsagar, 2003: "Estimation of annual and seasonal temperatures over Indian stations using optimal normal", en *Mausam*, 54:615–622.
- Tukey, J.W., 1977: *Exploratory Data Analysis*. Reading, Massachusetts, Addison Wesley.
- Von Storch, H. y F.W. Zwiers, 1999: *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Wilks, D.S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. San Diego, Academic Press.
-

## **CAPÍTULO 5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA ANALIZAR CONJUNTOS DE DATOS**

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se exponen algunos de los conceptos y métodos estadísticos de que disponen los climatólogos, pero no se especifican detalles sobre temas complejos. Algunos métodos estadísticos se abordan solo someramente, mientras que otros se omiten. Las referencias que figuran al final del capítulo, así como los libros de texto sobre teoría y métodos estadísticos, proporcionan información más detallada. Las dos referencias que todo climatólogo debería tener son *Some Methods of Climatological Analysis* (WMO-No. 199) y *On the Statistical Analysis of Series of Observations* (WMO-No. 415). Dado que van apareciendo rápidamente nuevos y mejores métodos estadísticos y analíticos, los climatólogos deberían mantenerse al día de las técnicas vigentes que tienen aplicaciones prácticas en la climatología.

El principal interés de la utilización de datos meteorológicos o climatológicos observados no consiste en describir los datos (véase el capítulo 4), sino en hacer deducciones a partir una representación limitada (las muestras de datos observados) de fenómenos físicos complejos que son útiles para los usuarios de información climática. La interpretación de datos climatológicos suele incluir comparaciones espaciales y temporales de las características de las distribuciones de frecuencias. Estas comparaciones permiten responder preguntas frecuentes como:

- ¿son iguales las temperaturas medias registradas durante un determinado intervalo de tiempo en lugares diferentes?;
- ¿es igual la variabilidad de la precipitación en diferentes lugares?;
- ¿cambia con el tiempo el rango diario de temperatura de un lugar y, de ser así, de qué manera?, y
- ¿qué probabilidad hay de que ocurran tormentas tropicales en una zona?

Las deducciones se basan directamente en la teoría probabilística y, por lo tanto, la utilización de métodos estadísticos para hacer deducciones se basa en el debido razonamiento matemático. Por estadística se entiende la ciencia pura y aplicada para crear, desarrollar y aplicar técnicas de manera tal que pueda evaluarse la incertidumbre de las inferencias inductivas. La estadística es la herramienta que permite convertir los datos brutos en información útil y se emplea para analizar datos y modelos climáticos y para la predicción climática. Los métodos estadísticos confieren un valor a la confianza relativa a cualquier decisión basada en la aplicación de los procedimientos.

La confianza que puede asignarse a una decisión es importante debido a los riesgos que podría implicar una decisión errónea. Los datos observados representan solo una muestra del sistema físico del clima y el tiempo y, por lo general, implican cierto grado de error. Las conclusiones pueden ser correctas o incorrectas. Por lo tanto, se necesitan factores cuantitativos que describan la confianza relativa a las decisiones para utilizar correctamente la información contenida en una base de datos.

### **5.2 HOMOGENEIZACIÓN**

El análisis de los datos climáticos para detectar cambios y tendencias es más fiable cuando se utilizan conjuntos de datos homogeneizados. En un conjunto de datos climáticos homogéneo todas las fluctuaciones contenidas en su serie temporal reflejan la variabilidad y el cambio reales del elemento climático representado. La mayoría de los métodos estadísticos parten de la hipótesis de que los datos que se están examinando están lo más exentos posible de errores



debidos a los instrumentos, la codificación y el proceso y otros errores no meteorológicos o no climatológicos. Sin embargo, por lo general, los datos meteorológicos o climatológicos ni son homogéneos ni están libres de errores. Los errores pueden ser desde sistemáticos (afectan a todo un conjunto de observaciones de la misma manera, como los errores constantes en la calibración de instrumentos o la conversión incorrecta de las unidades) hasta aleatorios (cualquier observación puede estar sujeta a un error que puede ser tanto positivo como negativo, como las diferencias de paralaje entre los observadores que leen un barómetro de mercurio).

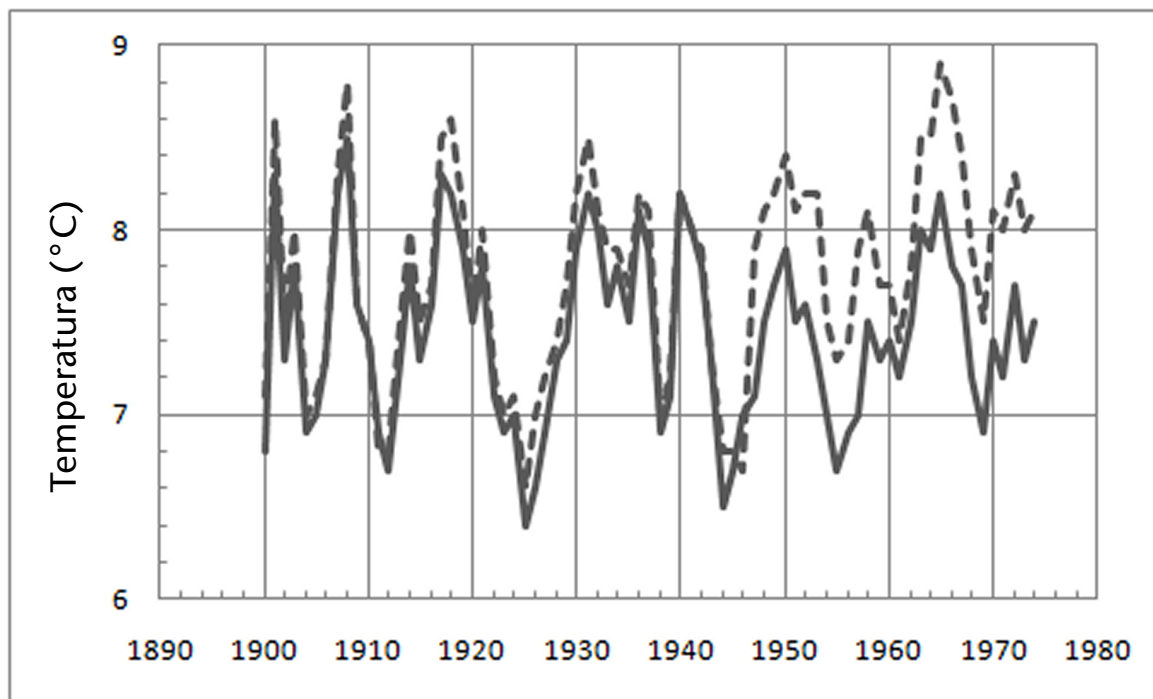
La mejor manera de mantener la homogeneidad del registro es evitar cambios en la recopilación, el tratamiento, la transmisión y el proceso de los datos. Es muy aconsejable alterar lo menos posible las prácticas y los instrumentos de observación (véase el documento *Guide to the GCOS Surface and Upper-Air Networks: GSN and GUAN* (WMO/TD-No. 1106), 3.4). Lamentablemente, la mayoría de los conjuntos de datos climatológicos de largo período se han visto afectados por varios factores que no están relacionados con el clima a gran escala. Estos incluyen cambios en la ubicación geográfica; la utilización de las tierras locales y la cubierta terrestre; los tipos, la exposición, el montaje y la protección de instrumentos; las prácticas de observación; los cálculos, las claves y las unidades, y los acontecimientos históricos y políticos. Algunos cambios pueden causar discontinuidades bruscas como saltos (por ejemplo, tras un cambio en los instrumentos o el emplazamiento), mientras que otros pueden causar sesgos graduales (por ejemplo, como consecuencia del desarrollo urbanístico en las inmediaciones de la estación). En ambos casos, las series temporales conexas dejan de ser homogéneas y esta falta de homogeneidad puede influir en la correcta evaluación de las tendencias climáticas. Cabe señalar que los cambios de emplazamiento no siempre afectan a las observaciones de todos los elementos ni afectan a las observaciones de todos los elementos por igual. La conveniencia de que el registro sea homogéneo radica fundamentalmente en la necesidad de detectar y señalar los cambios en el clima a gran escala. Sin embargo, es posible que para realizar algunos estudios sea necesario reflejar ciertas "faltas de homogeneidad" en los datos, por ejemplo, para investigar los efectos de la urbanización en el clima local o los efectos del crecimiento de la vegetación en el microclima de un ecosistema.

Para estudiar la homogeneidad, las pruebas estadísticas deberían utilizarse junto con los metadatos. En los casos en los que la historia de la estación está bien documentada y se han efectuado suficientes mediciones paralelas respecto de los cambios de emplazamiento e instrumentos, debería procederse a una homogeneización basada en esa información cualitativa y cuantitativa. Por lo tanto, el archivo de todos los metadatos históricos es de suma importancia para homogeneizar eficazmente las series temporales de datos climatológicos y todos los servicios meteorológicos deberían prestarle especial atención (véanse los capítulos 2 y 3).

Tras el análisis de los metadatos, las pruebas estadísticas pueden encontrar otras faltas de homogeneidad. Las pruebas suelen depender de la escala temporal de los datos; las pruebas utilizadas para los datos diarios son diferentes de las utilizadas para datos mensuales y de otras escalas. Los resultados de esos procedimientos de homogeneización estadística se han de verificar una vez más con los metadatos existentes. En principio, puede utilizarse cualquier prueba estadística que compare un parámetro estadístico de dos muestras de datos. Pero, en general, se emplean pruebas de homogeneidad especiales que verifican, de una sola vez, toda la duración de una serie. Tanto las pruebas no paramétricas (en las que no se barajan supuestos sobre las distribuciones estadísticas) como las paramétricas (en las que se conoce la distribución de frecuencias o el supuesto al respecto es correcto) resultan eficaces.

Al escoger una prueba de homogeneidad, es muy importante tener presente la forma de la distribución de frecuencias de los datos. Algunos conjuntos de datos tienen una distribución acampanada (normal o gaussiana); en esos casos, un método paramétrico da buen resultado. Otros (como los datos sobre precipitación obtenidos en un emplazamiento con gran variabilidad interanual) no tienen una distribución acampanada y, en ese caso, resultarán mejores las pruebas no paramétricas clasificadas. Cuando se evalúe la confianza en los resultados de cualquier prueba, deberían tomarse en consideración los efectos de la autocorrelación serial, el número de posibles puntos de cambio en una serie (documentados con metadatos y sin documentar), las tendencias y oscilaciones y los períodos de registro breves que pueden ser anómalos.



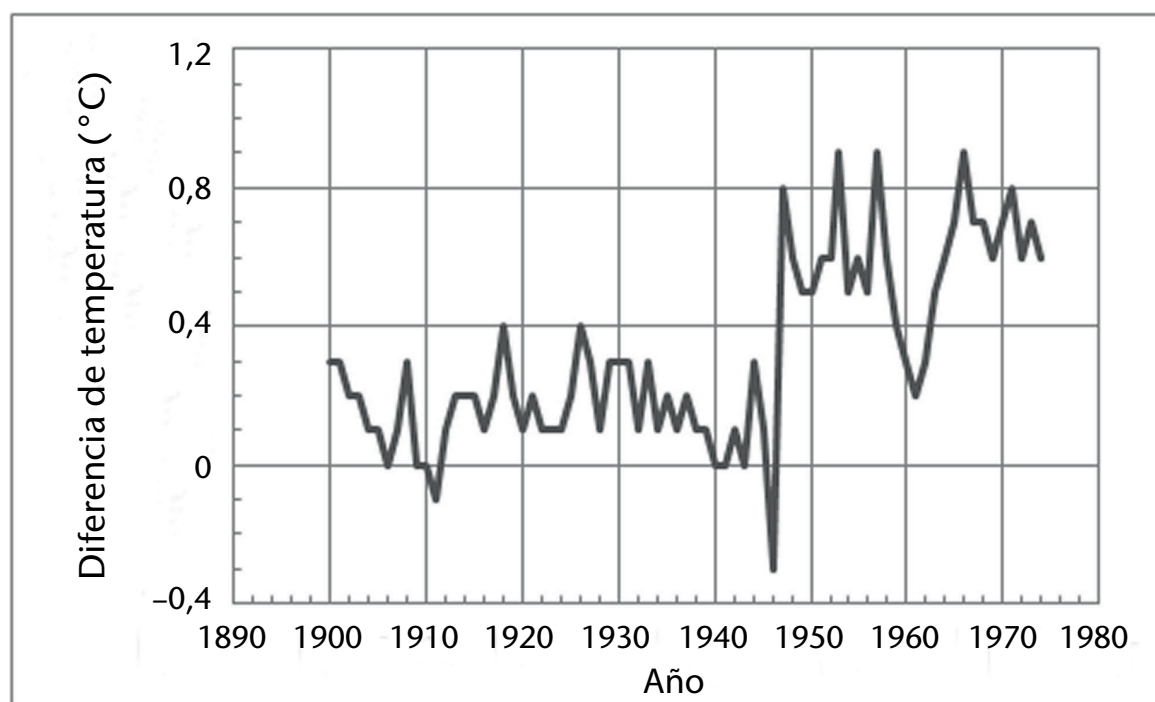


**Figura 5.1. Ejemplo de una serie temporal propuesta (línea discontinua) y una serie temporal de referencia (línea continua)**

Muchos métodos se basan en la comparación de los datos que se han de homogeneizar (serie propuesta) con una serie de referencia. Idealmente, una serie temporal de referencia deberá haber experimentado todas las influencias climáticas generales de la serie propuesta, pero ninguno de sus sesgos posibles y artificiales. Si la serie propuesta es homogénea, cuando esta y la serie de referencia se comparan mediante el método de las diferencias (en el caso de elementos medidos en una escala de intervalos, como la temperatura) o mediante el cálculo de los cocientes o los cocientes logarítmicos (en el caso de los elementos medidos en una escala proporcional, como la precipitación), la serie temporal resultante no mostrará ni cambios repentinos ni tendencias, sino que oscilará en torno a un valor constante. Sin embargo, si hay una o más faltas de homogeneidad, estas resultarán evidentes en la serie temporal de diferencias o de cocientes. En la figura 5.1 se muestra un ejemplo de una serie propuesta observada y una serie de referencia, y en la figura 5.2 se muestra un ejemplo de una serie de diferencias que indica una falta de homogeneidad en una serie propuesta.

Las series temporales de referencia dan buen resultado cuando el conjunto de datos tiene una cantidad de valores lo suficientemente grande como para garantizar una buena relación climatológica entre cada serie propuesta y las zonas aledañas utilizadas para establecer la serie de referencia, y cuando no haya faltas de homogeneidad que afecten a todas o a la mayoría de las estaciones o valores disponibles. En general, se requiere una red más densa para los elementos climáticos o los tipos climáticos con un alto grado de variabilidad espacial (por ejemplo, se necesitan más puntos de datos para la precipitación que para la temperatura y se necesitan más puntos de datos para homogeneizar la temperatura en un clima de temperatura muy variable que en uno de temperatura menos variable). Cuando se produce un cambio casi simultáneo de instrumentos en toda una red, las series de referencia no resultarían eficaces debido a que todos los puntos de datos se verían afectados de la misma manera. Cuando no se pueda establecer una serie de referencia adecuada, será necesario evaluar posibles puntos críticos y factores de corrección sin utilizar ningún dato de las estaciones colindantes.

El gráfico de doubles masas se emplea a menudo en el ámbito de la hidrometeorología para verificar las medidas de precipitación y escorrentía, pero puede utilizarse para la mayoría de los elementos. El total acumulado de la serie propuesta se traza en un gráfico donde figura el total acumulado de la serie de referencia correspondiente a cada período disponible. Si la relación entre la serie propuesta y la serie de referencia se mantiene constante a lo largo

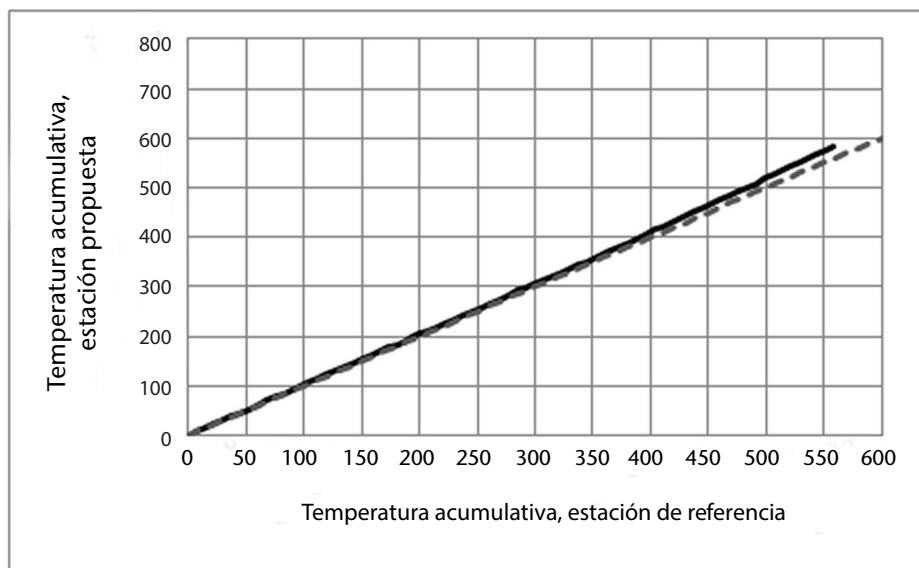


**Figura 5.2. Ejemplo de una serie temporal de diferencias**

del tiempo, la curva de dobles masas resultante debería tener una pendiente constante. Una variación importante en la pendiente o la forma de la curva indica que se ha producido un cambio en la relación entre ambas series. Dado que las variaciones pueden ocurrir de forma natural, es recomendable que los cambios aparentes en la pendiente se manifiesten durante un período continuo bien definido de al menos cinco años y que guarden coherencia con los fenómenos indicados en los registros de metadatos de la estación antes de concluir que hay falta de homogeneidad. En la figura 5.3 se muestra un gráfico de dobles masas para los mismos datos representados en las figuras 5.1 y 5.2. Como a menudo es difícil determinar dónde cambia la pendiente en un gráfico de dobles masas, se suele trazar un gráfico residual de las diferencias acumulativas entre los datos de la estación propuesta y la estación de referencia en función del tiempo (figura 5.4). En el gráfico residual se observa más claramente el cambio en la pendiente. El gráfico de dobles masas puede utilizarse para detectar más de un cambio en la proporcionalidad a lo largo del tiempo. Cuando el gráfico de dobles masas muestra un cambio en la pendiente, es posible derivar factores de corrección calculando la relación entre las pendientes antes y después de un punto de cambio.

Existen varias pruebas de estacionariedad (hipótesis de que las características de una serie temporal no cambian con el transcurso del tiempo). Una de ellas es la prueba de tandas, que parte de la hipótesis de que las tendencias y otras formas de persistencia que se dan en una secuencia de observaciones son meramente fortuitas. Esta se basa en el número total de tandas de los cambios direccionales observados en los valores consecutivos. Un número de tandas muy pequeño es indicativo de la persistencia o las tendencias, mientras que un número de tandas muy grande es sinónimo de oscilaciones. La estacionariedad de las tendencias centrales y la variabilidad entre las partes de una serie son importantes. Para examinar estas características se emplean técnicas que abarcan métodos paramétricos y no paramétricos.

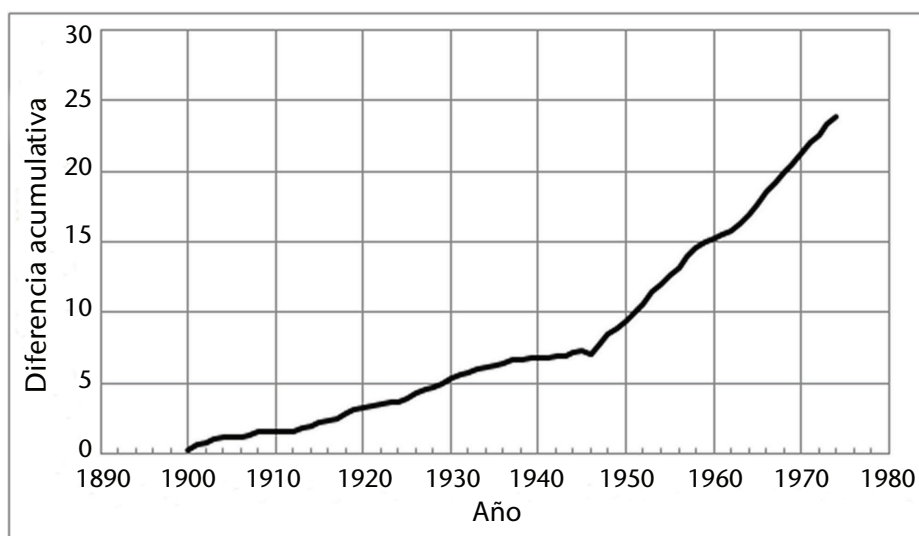
Se ha de tener precaución cuando la resolución de los datos sea submensual (como las observaciones diarias u horarias) puesto que uno de los usos a los que se destinan los datos diarios homogéneos es la evaluación de los cambios experimentados en los extremos. Independientemente de cómo se definan, los extremos constituyen fenómenos poco comunes que, a menudo, se deben a un conjunto de condiciones meteorológicas singulares. Si se dispone de pocos puntos de datos sobre los extremos para efectuar dicha evaluación, puede resultar difícil determinar el ajuste de homogeneidad correcto respecto de esas condiciones singulares. Los extremos deberían considerarse parte de todo el conjunto de datos y, por lo tanto, no



**Figura 5.3. Ejemplo de un gráfico de doble masa donde la línea discontinua representa una pendiente de 1**

deberían homogeneizarse de manera separada, sino junto con todos los datos. Por lo general, las técnicas de homogeneización para los datos de la temperatura mensual, estacional y anual son satisfactorias, pero la homogeneización de los datos y extremos diarios sigue resultando difícil.

Si bien existen muchas técnicas objetivas para detectar y ajustar la falta de homogeneidad de los datos, la aplicación real de dichas técnicas sigue siendo subjetiva o lo es, al menos, la decisión de aplicar una determinada técnica. Esto significa que cuando se intenta llevar a cabo una homogeneización por cuenta propia es muy fácil que los datos resultantes sean bastante diferentes. Por eso, es importante conservar una documentación detallada y completa de todos los pasos y todas las decisiones referentes al proceso. Los datos que se han ajustado no deberían considerarse absolutamente "correctos" del mismo modo que los datos originales tampoco deberían siempre considerarse "erróneos". Los datos originales siempre deberían conservarse.



**Figura 5.4. Ejemplo de un gráfico residual de doble masa**

Las técnicas relativas a la evaluación de la homogeneidad y el ajuste de los datos constituyen un ámbito de desarrollo dinámico, y tanto las herramientas teóricas como prácticas continúan evolucionando. Por lo tanto, debería hacerse un intento por mantenerse al corriente de las técnicas más recientes.

### 5.2.1 Evaluación de los datos homogeneizados

La evaluación de los resultados de la detección y el ajuste de la homogeneidad es una labor que requiere mucho tiempo, pero es inevitable, independientemente del método que se emplee. Es muy importante comprender qué factores de ajuste se han utilizado para mejorar la fiabilidad de las series temporales y para hacer mediciones comparables en toda la extensión de las mismas. A veces, es necesario aplicar una técnica que se ha concebido para otras circunstancias (como otro clima, otro elemento meteorológico o climatológico u otra densidad de red), y es importante analizar la calidad del resultado de la homogeneización. Por ejemplo, la mayoría de las técnicas que se utilizan para homogeneizar datos de precipitación mensual o anual han sido concebidas y puestas a prueba en climas lluviosos con precipitaciones todo el año y pueden resultar muy deficientes cuando se aplican a datos sobre climas con estaciones muy secas.

Para evaluar las correcciones, podrían compararse los datos ajustados y sin ajustar con información independiente, como datos de países vecinos, conjuntos de datos reticulados o registros indirectos, como los relativos a la fenología, diarios con observaciones o fechas de congelación y deshielo. Cuando se recurra a estas estrategias, también habrá que tener presentes sus limitaciones. Por ejemplo, los conjuntos de datos reticulados podrían verse afectados por los cambios en el número de estaciones a lo largo del tiempo o, en un determinado punto de la retícula, su correlación con los datos originales de una estación aledaña o ubicada en el mismo emplazamiento podría ser inadecuada.

Otro criterio consiste en examinar a nivel nacional series temporales promediadas por zona para datos ajustados y sin ajustar y comprobar si el procedimiento de homogeneización ha modificado las tendencias que cabía esperar dada la información disponible sobre la red de estaciones. Por ejemplo, cuando se han sustituido de manera generalizada observaciones vespertinas por observaciones matutinas, los datos de temperatura sin ajustar provocan un sesgo de enfriamiento en las series temporales dado que las observaciones matutinas son normalmente más bajas que las vespertinas.

Si los resultados de la homogeneización son válidos, el conjunto de las series temporales recién ajustadas permitirá indicar las variaciones temporales del elemento analizado en mejores condiciones que los datos originales. Sin embargo, ciertos valores individuales pueden seguir resultando incorrectos o incluso haber empeorado debido a la homogeneización. En la publicación *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WMO/TD-No. 1186), sección 3.4, tabla 4, y en varias de las referencias que figuran al final del presente capítulo se ofrecen descripciones más completas de varias pruebas ampliamente utilizadas.

## 5.3 AJUSTE DE MODELOS PARA EVALUAR LAS DISTRIBUCIONES DE DATOS

Una vez que se ajusten los errores y las faltas de homogeneidad que se hayan detectado en un conjunto de datos, deberían utilizarse las distribuciones estadísticas especificadas en la sección 4.4.1 para modelizar las distribuciones de frecuencias observadas y así aprovechar los métodos estadísticos. Una distribución de frecuencias teórica puede ajustarse a los datos mediante la incorporación de estimaciones de los parámetros de la distribución, que se calculan a partir de muestras de datos observados. Las estimaciones pueden basarse en diferentes cantidades de información o de datos. El número de fragmentos de información o de datos no relacionados que se usan para estimar los parámetros de una distribución se llama grado de libertad. Por lo general, cuanto mayores sean los grados de libertad, mejor será la estimación. Cuando la curva suave derivada teóricamente se traza con los datos, puede evaluarse visualmente el grado de concordancia entre el ajuste de la curva y los datos.

El estudio de los residuos es sumamente útil para comprender los datos y para indicar los cambios que deben introducirse en un modelo o en los datos. Un residuo es la diferencia entre un valor observado y el valor del modelo correspondiente. Un residuo no es sinónimo de valor anómalo. Un valor anómalo es un valor raro, inusual o singular de la serie de datos original. Una representación gráfica de los residuos es útil para determinar configuraciones. Por lo general, si se observa una configuración residual, como oscilaciones, agrupaciones y tendencias, el modelo no es adecuado para los datos. Los datos anómalos (unos cuantos valores residuales que son muy diferentes de la mayoría de los valores) sirven para indicar valores de datos probablemente sospechosos o erróneos. Normalmente, en análisis posteriores suelen considerarse como extremos. Si no existen configuraciones y si los valores de los residuos parecen estar dispersos de manera aleatoria, podrá concluirse que el modelo es adecuado para los datos.

Si se va a efectuar el ajuste de una distribución de frecuencias observada mediante un modelo estadístico, los supuestos sobre el modelo y el proceso de ajuste deben ser válidos. La mayoría de los modelos parten del supuesto de que los datos son independientes (una observación no se ve afectada por ninguna otra observación). La mayoría de los métodos comparativos utilizados en las pruebas sobre calidad de ajuste suponen que la distribución de los errores es aleatoria e independiente. Si las hipótesis no son válidas, las conclusiones a las que lleva dicho análisis pueden ser incorrectas.

Una vez que se hayan ajustado los datos mediante una distribución de frecuencias estadística adecuada, cumpliendo debidamente todos los criterios de independencia y aleatoriedad y otros criterios sobre muestreo, y que se haya validado el ajuste (véase la sección 4.4), el modelo puede utilizarse para representar los datos. Pueden hacerse deducciones que están sustentadas por la teoría matemática. El modelo proporciona estimaciones sobre la tendencia central, la variabilidad y las propiedades de orden superior de la distribución (como la asimetría o la curtosis). También puede determinarse la confianza que puede asignarse a estas estimaciones de muestra para representar condiciones físicas reales. Otras características, como la probabilidad de que una observación exceda un determinado valor, también pueden estimarse aplicando tanto la teoría probabilística como la teoría estadística a la distribución de frecuencias que se ha modelizado. Todas estas tareas resultan mucho más difíciles, cuando no imposibles, si se usan los datos originales en vez de la distribución de frecuencias ajustada.

#### 5.4 TRANSFORMACIÓN DE DATOS

La distribución de frecuencias normal o gaussiana se usa de modo generalizado, pues se ha estudiado ampliamente en estadística. Si los datos no se ajustan bien a la distribución normal, la transformación de los datos puede dar lugar a una distribución de frecuencias que es casi normal, lo que permite que la teoría subyacente de la distribución normal sirva de fundamento para muchos usos deductivos. La transformación de datos debe hacerse cuidadosamente de modo que los datos transformados sigan representando los mismos procesos físicos que los datos originales y puedan hacerse conclusiones correctas.

Hay varias maneras de determinar si la distribución de un elemento es en esencia no normal. Es relativamente fácil hacer una inspección visual de los histogramas, los diagramas de dispersión o los diagramas de probabilidad-probabilidad (P-P) o cuantil-cuantil (C-C). Puede hacerse una evaluación más objetiva efectuando desde un simple examen de la asimetría y la curtosis (véanse las secciones 4.4 y 4.4.5) hasta pruebas deductivas de normalidad.

Antes de introducir cualquier transformación, un analista debe cerciorarse de que la falta de normalidad se debe a una razón válida. Las razones que carecen de validez para explicar la falta de normalidad abarcan errores cometidos al introducir datos y valores de datos que faltan cuya ausencia no se ha declarado. Otra razón que no es válida para justificar la falta de normalidad puede ser la presencia de datos anómalos, ya que pueden ser una parte realista de una distribución normal.

Las transformaciones de datos más comunes utilizadas para mejorar la normalidad son la raíz cuadrada, la raíz cúbica y las transformaciones logarítmicas e inversas. La raíz cuadrada

hace que los valores menores que 1 sean relativamente mayores y los valores mayores que 1, relativamente menores. Si los valores pueden ser positivos o negativos, debe añadirse una compensación constante antes de obtener la raíz cuadrada, de modo que todos los valores sean mayores o iguales que 0. La raíz cúbica tiene un efecto parecido al de la raíz cuadrada, pero no requiere el uso de una compensación para el manejo de los valores negativos. Las transformaciones logarítmicas reducen la gama de valores, convirtiendo a los valores pequeños en valores relativamente grandes y a los valores grandes en relativamente pequeños. Deberá primero añadirse una compensación constante si hay valores menores o iguales que 0. Una transformación inversa convierte a números muy pequeños en números muy grandes y a números muy grandes en números muy pequeños; deben evitarse los valores de 0.

Estas transformaciones se han indicado en el orden de potencia relativa, desde la más débil hasta la más fuerte. Es recomendable utilizar la mínima cantidad de transformaciones necesarias para mejorar la normalidad. Si un elemento meteorológico o climatológico posee una distribución de frecuencias inherente muy poco normal, como la distribución de la nubosidad y de la insolación en forma de "U", no existen transformaciones simples que permitan normalizar los datos.

Todas las transformaciones comprimen más el lado derecho de una distribución que el lado izquierdo y reducen más los valores más altos que los valores más bajos. Por lo tanto, son eficaces en el caso de las distribuciones sesgadas en sentido positivo, como la precipitación y la velocidad del viento. Si una distribución está sesgada en sentido negativo, ello debe reflejarse (los valores se multiplican por -1 y luego se añade una constante para que todos los valores sean mayores que 0) con el fin de invertir la distribución antes de aplicar una transformación, y debe reflejarse nuevamente para reestablecer el orden inicial del elemento.

Las transformaciones de datos ofrecen muchas ventajas, pero deberían utilizarse correctamente y según procedimientos bien fundamentados. Todas las transformaciones mencionadas tienen por objeto mejorar la normalidad mediante la reducción de la separación relativa de los datos en el lado derecho de la distribución más que en su lado izquierdo. Sin embargo, el mero hecho de modificar las distancias relativas existentes entre puntos de datos, que es la manera en la que estas transformaciones tratan de mejorar la normalidad, plantea problemas en la interpretación de los datos. Todos los puntos de datos permanecen en el mismo orden relativo que ocupaban antes de la transformación, lo que permite una interpretación de los resultados respecto del valor creciente del elemento. Sin embargo, es probable que las distribuciones transformadas resulten más difíciles de interpretar desde el punto de vista físico debido a la naturaleza curvilínea de las transformaciones. Por lo tanto, el analista deberá ser cauto al interpretar los resultados basados en datos transformados.

## 5.5 ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES

Los principios que rigen el ajuste de los modelos (véase la sección 5.3) también guían el análisis de las series temporales. Un modelo se ajusta a la serie de datos; el modelo puede ser lineal, curvilíneo, exponencial o periódico o tener otra formulación matemática. El mejor ajuste (que minimiza las diferencias entre la serie de datos y el modelo) se logra generalmente utilizando técnicas de los mínimos cuadrados (minimizando la suma de los cuadrados de las desviaciones de los datos respecto de la curva de ajuste). Los residuos del mejor ajuste se examinan para buscar configuraciones y, si estas se encuentran, el modelo se ajusta para incorporarlas.

En climatología, las series temporales se han analizado con diversas técnicas que descomponen una serie en componentes de dominio del tiempo o de dominio de frecuencias. Un supuesto fundamental de estos modelos es el de la estacionariedad (cuando características de las series tales como la media y la varianza no cambian a lo largo de las series). Generalmente, los datos climatológicos no satisfacen esta condición aun cuando los datos sean homogéneos (véase la sección 5.2).

A las técnicas clásicas de análisis espectral se suman los análisis de Gabor y de ondas pequeñas. Al permitir que los subintervalos de una serie temporal sean modelizados con diferentes escalas y resoluciones, la condición de estacionariedad deja de ser firme. Estos análisis son particularmente



idóneos para representar series temporales con subintervalos que tienen diferentes características. Los análisis de ondas pequeñas dan buen resultado cuando la serie temporal presenta picos o discontinuidades bruscas. En comparación con las técnicas clásicas, resultan particularmente eficientes para las señales en las que tanto la amplitud como la frecuencia varían con el tiempo. Una de las principales ventajas de estos análisis "locales" es la capacidad de presentar series temporales de los procesos climáticos en las coordenadas de frecuencia y tiempo, estudiando y visualizando la evolución de los diversos modos de variabilidad durante un largo período. Se utilizan no solo como un recurso para determinar las escalas de variaciones no estacionarias, sino también como una herramienta para el análisis de datos con el fin de facilitar la comprensión inicial de un conjunto de datos. En el campo de la climatología ha habido muchas aplicaciones de estos métodos, como en el caso de los estudios del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación del Atlántico Norte (OAN), la turbulencia atmosférica, las relaciones espaciales y temporales de la precipitación y las características de las olas oceánicas.

Sin embargo, estos métodos tienen ciertas limitaciones. La más importante para el análisis de ondas pequeñas es que se dispone de un número infinito de funciones de onda pequeña para fundamentar un análisis y que, a menudo, los resultados difieren en función del tipo de onda pequeña utilizada. Esto dificulta en cierto modo la interpretación de los resultados puesto que puede llegarse a conclusiones diferentes acerca del mismo conjunto de datos si se emplean diferentes funciones matemáticas. Por lo tanto, es importante relacionar la función de onda pequeña con el mundo físico antes de escoger una determinada onda pequeña. Los análisis de Gabor y de ondas pequeñas son técnicas emergentes y, aunque se hayan definido desde el punto de vista matemático, un mayor perfeccionamiento de las técnicas y de los métodos de aplicación permitiría atenuar sus limitaciones.

Otras técnicas que se utilizan comúnmente para analizar las series temporales son los análisis de autorregresión y de media móvil. La autorregresión es una regresión lineal del valor de una serie temporal respecto de uno o más valores precedentes de la serie (autocorrelación). Un proceso de media móvil expresa una serie observada como una función de una serie aleatoria. La combinación de estos dos métodos se denomina modelo autorregresivo de media móvil (ARMA). Un modelo ARMA que permite la no estacionariedad se denomina modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA). Es posible que los modelos basados en la regresión se hagan más complejos de lo necesario, lo que da lugar a un ajuste exagerado. Dicho ajuste puede conducir a modelizar una serie de valores con diferencias mínimas entre el modelo y los valores de los datos, pero, como estos valores son solamente una representación de un proceso físico, tal vez sea conveniente una ligera falta de ajuste con el fin de representar el proceso verdadero. También se plantean otros problemas como la no estacionariedad de los parámetros utilizados para definir un modelo, los residuos no aleatorios (lo que indica un modelo inadecuado), y la periodicidad inherente a los datos aunque no modelizada. La validación dividida es eficaz para detectar el ajuste exagerado de los modelos. Este tipo de validación consiste en desarrollar un modelo sobre la base de una parte de los datos disponibles para luego validar el modelo con los datos restantes que no se utilizaron para desarrollar el modelo.

Una vez que los datos de las series temporales se hayan modelizado mediante una curva adecuada y el ajuste se haya validado, las propiedades matemáticas de la curva del modelo pueden utilizarse para efectuar evaluaciones que no hubieran sido posibles utilizando los datos originales, como la medición de las tendencias, el comportamiento cíclico o la autocorrelación y persistencia, junto con estimaciones de la confianza en estas medidas.

## 5.6 ANÁLISIS DE MÚLTIPLES VARIABLES

Los conjuntos de datos de múltiples variables son una compilación de observaciones de más de un elemento a lo largo del espacio y/o el tiempo. Por lo general, estos conjuntos se analizan con muchas finalidades diferentes. Entre ellas, las más importantes consisten en determinar si existen maneras más simples de representar un conjunto de datos complejo, si las observaciones se concentran en grupos que pueden clasificarse y si existe una interdependencia entre los elementos. Dichos conjuntos de datos se utilizan también para poner a prueba las hipótesis sobre



los datos. Por lo general, la secuencia de las observaciones no se toma en consideración en los análisis de múltiples variables. Las series temporales de más de un elemento suelen considerarse como un tema de análisis independiente con técnicas como el análisis a lo largo del espectro.

El análisis de los componentes principales, a veces denominado análisis de las funciones ortogonales empíricas, es una técnica para reducir las dimensiones de los datos de múltiples variables. El proceso simplifica un conjunto de datos complejo y se ha utilizado ampliamente para analizar datos climatológicos. Los métodos para analizar los componentes principales descomponen varias observaciones correlacionadas en un nuevo conjunto de funciones (ortogonales) sin correlación que contienen la varianza original de los datos. Estas funciones ortogonales empíricas, también llamadas componentes principales, se disponen por orden, de modo que el primer componente ilustre la mayor parte de la varianza, el segundo componente ilustre la segunda mayor parte de la varianza y así sucesivamente. Dado que, por lo general, la mayor parte de la varianza puede ilustrarse con unos pocos componentes, los métodos son eficaces para reducir el "ruido" de un campo observado. A menudo, los componentes individuales pueden relacionarse con un solo elemento meteorológico o climatológico. El método se ha empleado para analizar diversos campos que abarcan las temperaturas de la superficie del mar, las pautas regionales de la temperatura terrestre y la precipitación, las cronologías de los anillos arbóreos, la presión del nivel del mar, los contaminantes atmosféricos, las propiedades radiativas de la atmósfera y los escenarios climáticos. Los componentes principales también se han utilizado como un instrumento para la reconstrucción del clima, por ejemplo, para estimar un retículo espacial de un elemento climático procedente de datos indirectos cuando no se dispone efectivamente de las observaciones de ese elemento.

El análisis factorial permite reducir un conjunto de datos de un conjunto de observaciones grande a un conjunto de factores más pequeño. Este es semejante al análisis de los componentes principales con la salvedad de que no hay una falta de correlación entre los factores. Puesto que un factor puede representar las observaciones de más de un elemento, frecuentemente, la interpretación meteorológica o climatológica de un factor resulta difícil. Este método se ha utilizado principalmente en estudios de climatología sinóptica.

El análisis de conglomerados tiene por objeto dividir las observaciones en grupos con características semejantes. Existen muchos métodos de conglomeración y se utilizan distintos métodos para detectar diferentes configuraciones puntuales. Sin embargo, la mayoría de los métodos se basan en la proporción en que la distancia entre las medias de dos grupos es mayor que la distancia media dentro de un grupo. La medida de la distancia no tiene que ser la distancia euclídea habitual, pero debería cumplir ciertos criterios. Uno de ellos debería ser que la medida de la distancia desde el punto A hasta el punto B sea igual que la distancia desde el punto B hasta el punto A (simetría). Según un segundo criterio, la distancia debería tener un valor positivo (no negatividad). Según un tercer criterio, para tres puntos que forman un triángulo, la longitud de un lado debería ser menor o igual que la suma de las longitudes de los otros dos lados (desigualdad del triángulo). Un cuarto criterio debería ser que, si la distancia entre A y B es cero, A y B son iguales (certeza fija). La mayoría de las técnicas dividen los datos repetidamente en más y más conglomerados, lo que plantea al analista el problema de determinar qué número de conglomerados es suficiente. Lamentablemente, no existen reglas objetivas para adoptar esta decisión. Por lo tanto, el analista debería valerse de los conocimientos y la experiencia que ya posee para decidir cuándo se ha obtenido un número adecuado de conglomerados desde el punto de vista meteorológico o climatológico. El análisis de conglomerados se ha utilizado con diversas finalidades, como la construcción de regiones de precipitación homogéneas, el análisis de climatologías sinópticas y la predicción de la calidad del aire en un entorno urbano.

El análisis de la correlación canónica tiene por objeto determinar la interdependencia entre dos grupos de elementos. El método encuentra la combinación lineal de la distribución del primer elemento que da lugar a la correlación con la segunda distribución. Esta combinación lineal se extrae del conjunto de datos y el proceso se repite con los datos residuales, con la limitación de que la segunda combinación lineal no está correlacionada con la primera combinación. El proceso se repite nuevamente hasta que la combinación lineal deje de ser significativa. Este análisis se usa, por ejemplo, en las predicciones a partir de teleconexiones, en la reducción estadística de escala (véase la sección 6.7.5), en la determinación de regiones homogéneas para

la predicción de crecidas en una cuenca no aforada y en la reconstrucción de configuraciones espaciales del viento a partir de campos de presión. Un método de análisis similar que podría estudiarse es la descomposición en valores singulares. Este método, como el análisis de la correlación canónica, encuentra las combinaciones lineales de los dos grupos de elementos tratando de representar la máxima covarianza posible.

Todos estos métodos tienen supuestos y limitaciones. La interpretación de los resultados depende en gran medida del cumplimiento de los supuestos y de la experiencia del analista. Otros métodos, tales como el análisis de regresión múltiple y el análisis de covarianza, presentan incluso más limitaciones para la mayoría de los datos meteorológicos o climatológicos. El análisis de múltiples variables es complejo, ya que puede tener muchos resultados posibles y, por lo tanto, es necesario aplicarlo con el debido cuidado.

## 5.7 ANÁLISIS COMPARATIVOS

Al adaptar un modelo a los datos, ya sea una distribución de frecuencias o una serie temporal, es posible utilizar las características de ese modelo para análisis posteriores. Por lo general, se conocen bien las propiedades de las características del modelo, lo que permite llegar a una serie de conclusiones. En caso contrario, puede ser útil emplear la técnica de *bootstrap*. Esta técnica consiste en estimar las características de un modelo a partir de múltiples muestras aleatorias obtenidas a partir de la serie de observación original. Ofrece una alternativa a la realización de deducciones a partir de supuestos basados en parámetros cuando los supuestos son dudosos, la deducción paramétrica es imposible o cuando esta requiere formulas muy complicadas. La técnica de *bootstrap* es fácil de aplicar, pero puede ocultar su propio conjunto de supuestos que se manifestarían más formalmente en otros métodos.

Concretamente, se dispone de muchas pruebas para comparar las características de dos modelos con objeto de determinar qué nivel de confianza puede depositarse en los argumentos de que ambos conjuntos de datos modelizados tienen características subyacentes comunes. Al comparar dos modelos, el primer paso consiste en decidir cuáles son las características que se han de comparar. Podría tratarse de la media, la mediana, la varianza o la probabilidad de un fenómeno a partir de una distribución, o la fase o frecuencia de una serie temporal. En principio, pueden compararse todas las características computables de los modelos adaptados, aunque debería haber un motivo significativo (basado en razonamientos físicos) para hacerlo.

El siguiente paso consiste en formular la hipótesis nula. Esta es la hipótesis que se considera verdadera antes de realizar cualquier prueba y, en este caso, suele ser que las características modelizadas son las mismas. La hipótesis alternativa es la opuesta, es decir, que las características modelizadas no son las mismas.

Después se elige una prueba adecuada para comparar las características de ambos modelos. Algunas de las pruebas son paramétricas y dependen de los supuestos sobre la distribución, como la normalidad. Las pruebas paramétricas abarcan la prueba t de Student (para comparar las medias) y la prueba F de Fisher (para comparar la variabilidad). Otras pruebas son no paramétricas, por lo que no hacen supuestos sobre la distribución. Entre estas se incluyen las pruebas de los signos (para comparar las medianas) y la prueba Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones. Por lo general, las pruebas paramétricas son mejores (por lo que se refiere al nivel de confianza en las conclusiones), pero solo si los supuestos sobre la distribución necesarios son válidos.

La trascendencia de rechazar una hipótesis verdadera (o de aceptar una falsa) se expresa en términos de nivel de confianza o probabilidad. La prueba elegida permitirá mostrar si la hipótesis nula ofrece el nivel de confianza exigido. Algunas de las pruebas indicarán con qué nivel de confianza puede aceptarse la hipótesis nula. Si esta se rechaza, deberá aceptarse la hipótesis alternativa. Mediante este proceso, el analista podría afirmar, por ejemplo, que las medias de dos conjuntos de observaciones son iguales con un nivel de confianza del 99 %; por lo tanto, hay solo un 1 % de probabilidad de que las medias no sean iguales.

Independientemente de la hipótesis que se acepte, ya sea la nula o la alternativa, la conclusión puede ser errónea. Si se rechaza la hipótesis nula cuando, de hecho, es verdadera, se ha cometido un error de tipo I. Si se acepta la hipótesis nula cuando, de hecho, es falsa, se ha cometido un error de tipo II. Lamentablemente, si se reduce el riesgo de cometer un error de tipo I, se incrementa el riesgo de cometer un error de tipo II, de modo que se requiere un equilibrio entre ambos tipos. Este equilibrio debería basarse en la trascendencia de cometer cualquier tipo de error. En cualquier caso, el nivel de confianza respecto a la conclusión puede estimarse en función de la probabilidad y debería indicarse en la misma.

## 5.8 SUAVIZAMIENTO

Los métodos de suavizamiento permiten salvar la brecha que existe entre no hacer supuestos basados en una estructura formal de datos observados (el método no paramétrico) y hacer hipótesis muy firmes (el método paramétrico). Hacer un supuesto débil de que la verdadera distribución de los datos puede representarse mediante una curva suave permite revelar al analista configuraciones subyacentes de los datos. El suavizamiento aumenta las señales de los patrones climáticos al tiempo que reduce el ruido provocado por las fluctuaciones aleatorias. Las aplicaciones del suavizamiento incluyen análisis exploratorios de datos, la elaboración de modelos, la calidad del ajuste de una curva representativa (suave) de los datos, la estimación paramétrica y la modificación de los métodos normalizados.

La estimación de la densidad por núcleos es un método de suavizamiento; entre los ejemplos figuran las medias móviles, el suavizamiento gaussiano y el suavizamiento binomial. Los suavizamientos por núcleos estiman el valor que se da en un punto combinando los valores observados en torno a ese punto. El método de combinación es, a menudo, una media ponderada, y las ponderaciones dependen de la distancia desde el punto en cuestión. La dimensión del entorno utilizado se denomina ancho de banda; cuanto más ancha sea la banda, mayor será el suavizamiento. Los estimadores por núcleos son simples, pero presentan inconvenientes. La estimación por núcleos puede presentar un sesgo cuando la zona de definición de los datos está limitada, por ejemplo, al principio o al final de una serie temporal. Dado que se usa un ancho de banda para toda la curva, se aplica un grado de suavizamiento constante. Además, la estimación tiende a aplanar las crestas y los valles de la distribución de los datos. Las estimaciones por núcleos pueden mejorarse mediante una corrección de los sesgos de los límites utilizando núcleos especiales solamente cerca de los límites y variando los anchos de banda en diferentes segmentos de la distribución de datos. Puede que las transformaciones de datos (véase la sección 5.4) también mejoren la estimación.

Los estimadores *spline* se adaptan a una distribución de frecuencias por piezas sobre subintervalos de la distribución con polinomios de diversos grados. Una vez más, la cantidad y la colocación de los subintervalos afecta al grado de suavizamiento. La estimación efectuada cerca de los límites de los datos también resulta problemática. Los valores atípicos también pueden afectar seriamente al ajuste mediante *spline*, especialmente en regiones con pocas observaciones.

También existe una serie de métodos de suavizamiento más sofisticados, que, a menudo, no son paramétricos. Un ejemplo de estos es la estimación por máxima verosimilitud local, que es particularmente útil cuando el conocimiento previo del comportamiento del conjunto de datos puede llevar a una buena "primera aproximación" (en inglés, *first guess*) del tipo de curva que debería ajustarse. A veces, es difícil interpretar estos estimadores teóricamente.

En el caso de los datos de múltiples variables, el suavizamiento resulta más complejo debido a la cantidad de posibilidades de suavizamiento y el número de parámetros de suavizamiento que haya que establecer. A medida que aumenta el número de elementos de datos, el suavizamiento resulta cada vez más difícil. La mayoría de los gráficos tienen dos dimensiones solamente, de modo que la inspección visual del suavizado es limitada. La densidad por núcleos puede emplearse para suavizar datos de múltiples variables, pero los problemas de la estimación de los límites y los anchos de banda fijos pueden resultar incluso más difíciles que con datos univariantes.

Normalmente, en un espacio de variables múltiples suele haber amplias zonas vacías, salvo que haya numerosos valores de datos. La reducción de los datos a un número inferior de dimensiones, por ejemplo, mediante un análisis de los componentes principales, es una técnica de suavizamiento. La reducción de la dimensión debería tener por objeto conservar cualquier estructura o señal interesante de los datos de menor dimensión y eliminar los atributos que no sean interesantes o el ruido.

Una de las técnicas de suavizamiento más habituales es la regresión. Tanto los modelos de regresión lineales como no lineales son muy adecuados para modelizar un determinado elemento como una función de un conjunto de parámetros predictores, que permite especificar las relaciones y elaborar pruebas sobre la solidez de las relaciones. Sin embargo, estos modelos son susceptibles a los mismos problemas que cualquier otro modelo paramétrico dado que las hipótesis efectuadas afectan a la validez de las deducciones y a las predicciones.

Los modelos de regresión también se ven afectados por problemas de límites o el suavizamiento poco realista de los subintervalos de la gama de datos. Estos problemas pueden resolverse ponderando los subintervalos del dominio de datos con anchos de banda variables y aplicando una estimación polinómica cerca de los límites. Las estimaciones relativas a la regresión, que se basan en las estimaciones por mínimos cuadrados, pueden verse afectadas por observaciones con valores de respuesta inusuales (datos anómalos). Si el valor de un dato dista mucho de la mayoría de los valores, se tenderá a acercar la curva suave al valor aberrante más de lo que pueda justificarse. A menudo, cuando se recurre al suavizamiento no paramétrico ajustado, es difícil determinar sin ambigüedad si un valor es anómalo, puesto que el objetivo es suavizar todas las observaciones. Los valores anómalos podrían ser una respuesta meteorológica o climatológica válida o podrían ser aberrantes. Se requiere mayor investigación sobre los valores anómalos para garantizar la validez del valor. Las estimaciones relativas a la regresión también se ven afectadas por la correlación. Las estimaciones se basan en la hipótesis de que, desde el punto de vista estadístico, todos los errores son independientes del resto; la correlación puede afectar a las propiedades asintóticas de los estimadores y al comportamiento de los anchos de banda determinados a partir de los datos.

## 5.9 ESTIMACIÓN DE DATOS

Una de las principales aplicaciones de la estadística a la climatología es la estimación de valores de elementos cuando se dispone de pocos datos de observación o de ninguno o cuando los datos esperados no están disponibles. En muchos casos, la planificación y ejecución de los proyectos de los usuarios no pueden aplazarse hasta que se cuente con suficientes observaciones meteorológicas y climatológicas. Entonces, se utiliza la estimación para ampliar un conjunto de datos. La estimación también desempeña un papel en el control de calidad al permitir que un valor observado se compare con los valores lindantes tanto en el tiempo como en el espacio. Las técnicas para estimar datos son esencialmente aplicaciones de estadística, pero deberían también basarse en las propiedades físicas del sistema que se evalúa. En cualquier caso, es fundamental que los valores estimados estadísticamente sean realistas y coherentes con los fundamentos físicos.

La interpolación utiliza datos que están disponibles tanto antes como después del valor faltante (interpolación temporal), o en torno al valor faltante (interpolación espacial), para estimar dicho valor. En ciertos casos, es posible estimar un valor faltante mediante un proceso simple, como el cómputo de la media de los valores observados a ambos lados de la laguna. También se usan métodos de estimación complejos, teniendo en cuenta las correlaciones con otros elementos. Estos métodos abarcan las medias ponderadas, las funciones *spline*, las regresiones lineales y el krigeado. Puede que se basen solamente en las observaciones de un elemento o tengan en cuenta otra información, como la topografía o los resultados de los modelos numéricos. Las funciones *spline* pueden utilizarse cuando las variaciones espaciales son regulares. La regresión lineal permite incluir muchos tipos de información. El krigeado es un método geoestadístico que requiere una estimación de las covarianzas del campo estudiado. El cokrigeado introduce en las ecuaciones de krigeado la información proporcionada por otro elemento independiente.

La extrapolación amplía la gama de los valores de datos disponibles. Hay más posibilidades de error en los valores extrapolados porque las relaciones se utilizan fuera del dominio de los valores de los que se derivan las relaciones. Incluso si las relaciones empíricas correspondientes a un lugar o un período de tiempo dados parecen razonables, se ha de tener cuidado cuando se apliquen a otro lugar o período de tiempo puesto que los procesos físicos subyacentes pueden diferir dependiendo del lugar y el momento en el que se den. Los mismos métodos que se emplean para la interpolación pueden emplearse para la extrapolación.

### 5.9.1 Métodos de estimación matemáticos

En los métodos matemáticos se usan solo las características geométricas o polinómicas de un conjunto de valores puntuales para crear una superficie continua. Por ejemplo, los métodos de la ponderación de la distancia inversa y el ajuste de curvas, tales como las funciones *spline*. Estos métodos son interpoladores exactos; los valores observados se conservan en los emplazamientos en los que se miden.

La ponderación de la distancia inversa se basa en la distancia comprendida entre el lugar respecto del que se va a interpolar el valor y los lugares de las observaciones. A diferencia del método simple de los valores lindantes más cercanos (en el que se escoge la observación del lugar más próximo), la ponderación de la distancia inversa combina observaciones de varios lugares cercanos. Las ponderaciones se asignan a las observaciones en función de la distancia que las separa del lugar de interés; las estaciones cercanas tienen una mayor ponderación que las situadas en un lugar más lejano. A menudo, se emplea un criterio de "corte" para limitar o bien la distancia respecto a los lugares de observación, o bien el número de observaciones que se tienen en cuenta. Frecuentemente, se emplea la ponderación de la distancia inversa al cuadrado para atribuir aún más ponderación a los lugares más cercanos. En este método no se recurre a la racionalidad física; se supone que cuanto más cerca esté el lugar de la observación del lugar en el que se está haciendo la estimación de los datos, mejor será dicha estimación. Este supuesto deberá validarse con el debido cuidado, ya que tal vez no haya un fundamento meteorológico o climatológico para justificarlo.

Los ajustes mediante *spline* se ven afectados por la misma limitación que la ponderación de la distancia inversa. El campo resultante de un ajuste mediante *spline* supone que es posible representar los procesos físicos mediante el *spline* matemático. Este supuesto casi nunca tiene una justificación inherente. Ambos métodos dan mejor resultado en superficies suaves, por lo que tal vez no permitan obtener representaciones adecuadas en superficies que fluctúan notablemente.

### 5.9.2 Estimación basada en relaciones físicas

La coherencia física que existe entre diferentes elementos puede utilizarse para la estimación. Por ejemplo, si no se dispone de ciertas mediciones de la radiación global y es necesario estimarlas, podrían utilizarse elementos como la duración de la insolación y la nubosidad para estimar un valor faltante. También pueden utilizarse datos indirectos como información auxiliar para la estimación. A veces, cuando se comparan valores simultáneos de dos estaciones situadas una cerca de la otra, la diferencia o el cociente de los valores es aproximadamente constante. Esto ocurre más a menudo con los datos resumidos (correspondientes a meses o años) que con los relativos a intervalos de tiempo más breves (como los datos diarios). Esta diferencia o cociente constante puede usarse para estimar datos. Cuando se emplean estos métodos, las series que son objeto de comparación deberían estar suficientemente correlacionadas para que la comparación sea significativa. La elección del método debería depender, pues, de la estructura temporal de ambas series. El método de las diferencias puede emplearse cuando las variaciones del elemento meteorológico o climatológico sean relativamente similares entre una estación y otra. El método del cociente puede aplicarse cuando las variaciones temporales de ambas series no sean iguales, aunque sí proporcionales (este suele ser normalmente el caso cuando una serie tiene un límite inferior de cero, como ocurre con la precipitación o la velocidad del viento, por ejemplo). En caso de que estas condiciones no se cumplan, sobre todo cuando las varianzas de las series de



ambas estaciones no sean similares, no deberían utilizarse estas técnicas. Existen herramientas más complejas físicamente coherentes, como la regresión, el análisis discriminante (relativo al acontecimiento de fenómenos) y el análisis de los componentes principales.

Los métodos determinísticos se basan en una relación conocida entre un valor de un dato recogido *in situ* (predictando) y valores de otros elementos (parámetros predictores). A menudo, esta relación se basa en el conocimiento empírico sobre el predictando y el parámetro predictor. La relación empírica puede hallarse mediante análisis físicos o estadísticos y, frecuentemente, constituye una combinación en la que una relación estadística se deriva de valores basados en el conocimiento de un proceso físico. Para establecer dichas relaciones se suelen emplear métodos estadísticos como la regresión. El enfoque determinístico es estacionario en el tiempo y en el espacio y, por lo tanto, debe considerarse como un método global que refleja las propiedades de toda la muestra. Los parámetros predictores pueden ser otros elementos observados u otros parámetros geográficos, como la altitud, la pendiente o la distancia del mar.

### 5.9.3 Métodos de estimación espaciales

La interpolación espacial es un procedimiento para estimar el valor de las propiedades en emplazamientos no muestreados dentro de una zona cubierta por observaciones existentes. El motivo fundamental de la interpolación es que la similitud de valores es más probable entre los emplazamientos de observación que están cercanos que entre los que están muy alejados (coherencia espacial). Todos los métodos de interpolación espacial están basados en fundamentos teóricos, supuestos y condiciones que deben cumplirse para que un método pueda utilizarse correctamente. Por lo tanto, cuando se escoge un algoritmo de interpolación espacial, deben tenerse en cuenta la finalidad de la interpolación, las características del fenómeno que se ha de interpolar y las limitaciones del método.

Generalmente, a los métodos estocásticos relativos a la interpolación espacial se les denomina métodos geoestadísticos. Una característica que comparten estos métodos es el uso de una función de relación espacial para indicar la correlación entre valores recogidos en diferentes emplazamientos como una función de la distancia. La propia interpolación está estrechamente relacionada con la regresión. Estos métodos requieren el cumplimiento de ciertos supuestos estadísticos, por ejemplo, que el proceso siga una distribución normal, sea estacionario en el espacio o sea constante en todas las direcciones.

Aun cuando no sea mucho mejor que otras técnicas, el krigeado es un método de interpolación espacial que se ha usado frecuentemente para interpolar elementos como la temperatura del aire y del suelo, la precipitación, los contaminantes atmosféricos, la radiación solar y los vientos. La base de esta técnica es la proporción en la que la varianza entre los puntos cambia en el espacio y se expresa en un variograma. Un variograma muestra la forma en que la diferencia media entre los valores registrados en los puntos varía en función de la distancia y la dirección entre los puntos. Al elaborar un variograma, es necesario hacer algunos supuestos sobre las características de la variación observada en la superficie. Algunos de estos supuestos se refieren a la constancia de las medias en toda la superficie, la existencia de tendencias subyacentes y la aleatoriedad e independencia de las variaciones. El objetivo consiste en relacionar todas las variaciones con la distancia. Las relaciones entre un variograma y los procesos físicos pueden facilitarse eligiendo un modelo de variograma adecuado (por ejemplo, esférico, exponencial, gaussiano o lineal).

Algunos de los problemas que plantea el krigeado son la intensidad informática relativa a las bases de datos voluminosas, la complejidad de estimar un variograma y los supuestos críticos que deben efectuarse acerca de las características estadísticas de la variación. Este último problema reviste suma importancia. Aunque muchas variantes del krigeado permiten flexibilidad, en un principio, el método fue desarrollado para aplicaciones en las que las distancias entre los emplazamientos de observación eran cortas. En el caso de los datos climatológicos, las distancias entre los emplazamientos normalmente suelen ser grandes y, a menudo, el supuesto de campos que varían suavemente entre los emplazamientos no es realista. En estos casos también se pueden explorar enfoques alternativos como la interpolación asistida climatológicamente (CAI).

Dado que los campos meteorológicos o climatológicos, como la precipitación, se ven muy influenciados por la topografía, algunos métodos, como el análisis que utiliza el relieve para la hidrometeorología (AURELHY) y el modelo de regresión de parámetros-elevación en pendientes independientes (PRISM), incorporan la topografía en la interpolación de datos climáticos combinando el análisis de los componentes principales, la regresión lineal múltiple y el krigeado. Dependiendo del método utilizado, la topografía se define mediante la elevación, la pendiente y la dirección de la pendiente, generalmente promediadas en una zona. Por lo general, la resolución espacial de las características topográficas es mayor que la de los datos climáticos.

Entre los métodos más avanzados basados en fundamentos físicos cabe citar los que incorporan una descripción de la dinámica del sistema climático. En la predicción meteorológica y la modelización climática se utilizan habitualmente modelos similares (véase la sección 6.3). Gracias a una mayor disponibilidad de computadoras con la potencia y la capacidad de almacenamiento que requieren estos modelos, se está haciendo un uso más generalizado de estos modelos en la vigilancia del clima, especialmente, en la estimación del valor de los elementos climáticos en zonas alejadas de las observaciones reales (véase la sección 6.2.4 sobre reanálisis).

#### 5.9.4 Estimación de series temporales

A menudo, en las series temporales faltan valores cuya estimación es necesaria o valores que se han de estimar a escalas temporales más finas que las que proporcionan las observaciones. Es más fácil hacer estimaciones de una o unas pocas observaciones que de un largo período en el que faltan continuamente observaciones. En general, cuanto más largo sea el período que se ha de estimar, menor será el nivel de confianza que pueda asignarse a las estimaciones.

Para el análisis correspondiente a una sola estación, la estimación de uno o dos valores faltantes consecutivos se realiza, por lo general, mediante aproximaciones lineales simples, polinómicas o por *spline* que se ajustan teniendo en cuenta las observaciones inmediatamente anteriores y posteriores al período que se ha de estimar. El supuesto consiste en que las condiciones del período que se ha de estimar son similares a las condiciones dadas justo antes y después de dicho período. Se debe velar por que este supuesto sea válido. Un ejemplo de incumplimiento de este supuesto en la estimación de las temperaturas horarias es el paso de un intenso frente frío durante el período que se ha de estimar. La estimación de valores relativos a períodos más largos suele hacerse mediante la aplicación de técnicas de análisis de series temporales (véase la sección 5.5) a segmentos de las series que no presenten lagunas de datos. El modelo relativo a los valores que sí existen se aplica entonces a las lagunas. Al igual que interpolación espacial, la interpolación temporal debería ser objeto de una validación para garantizar que los valores estimados sean razonables. Los metadatos u otros corolarios sobre la serie temporal son útiles para determinar la racionalidad.

Para las escalas regional a local, se han desarrollado una serie de herramientas destinadas a completar y estimar las variables meteorológicas de las regiones sobre las que se dispone de escasos datos, como los generadores estocásticos de tiempo meteorológico, que utilizan características estadísticas de las series temporales meteorológicas observadas para simular otras series.

#### 5.9.5 Validación

Toda estimación se basa en alguna estructura subyacente o razonamiento físico. Por lo tanto, es muy importante comprobar que los supuestos formulados al aplicar el modelo de estimación se cumplan. Si estos no se cumplen, los valores estimados pueden contener errores que podrían ser graves y llevar a conclusiones incorrectas. En los análisis climatológicos, a menudo no se cumplen los supuestos de los modelos. Por ejemplo, en los análisis espaciales, la interpolación entre estaciones muy espaciadas implica que los patrones climatológicos entre las estaciones se conocen y pueden ser modelizados. En realidad, muchos factores (como la topografía, las peculiaridades locales o la existencia de masas de agua) influyen en el clima de una región. A menos que estos factores se incorporen adecuadamente en un modelo espacial, es probable que los valores interpolados sean incorrectos. En los análisis temporales, el hecho de hacer una



interpolación sobre una amplia laguna de datos implica que los valores que representan las condiciones existentes antes y después de dicha laguna pueden utilizarse para estimar los valores de dicha laguna. En realidad, cuanto más variables sean las características meteorológicas de un lugar, menor será la probabilidad de que se cumpla ese supuesto y, por lo tanto, los valores interpolados podrían ser incorrectos.

La gravedad de cualquier error de interpolación está relacionada con el uso que se hace de los datos. Las conclusiones y opiniones basadas en las necesidades a nivel microescalar (información detallada sobre una zona local) se verán mucho más afectadas por los errores que las basadas en las necesidades a nivel macroescalar (información general sobre una zona amplia). Al hacer estimaciones de datos, debería tenerse muy en cuenta la sensibilidad de los resultados al uso que se hace de los datos.

La validación es imprescindible cuando se realiza una estimación. La validación dividida es una técnica simple y eficaz. Consiste en utilizar una gran parte de un conjunto de datos para desarrollar los procedimientos de estimación al tiempo que se reserva un subconjunto más pequeño del conjunto de datos para poner a prueba el método. Los datos del subconjunto más pequeño se estiman con los procedimientos desarrollados a partir de la parte más grande del conjunto y los valores estimados se comparan con los observados. La validación cruzada es otra herramienta simple y eficaz para comparar diversas hipótesis, ya sea sobre los modelos (como el tipo de variograma y sus parámetros o la dimensión del entorno del krigeado), o sobre los datos, utilizando únicamente la información disponible en una determinada muestra de conjunto de datos. La validación cruzada se lleva a cabo eliminando una observación de la muestra de datos para luego estimar el valor eliminado sobre la base de las observaciones restantes. Esto se repite eliminando de la muestra otra observación diferente, y así sucesivamente, eliminando cada observación por vez. Posteriormente, los residuos que quedan entre los valores observados y los valores estimados pueden ser objeto de un análisis estadístico ulterior o pueden representarse gráficamente para su inspección visual. La validación cruzada ayuda a cuantificar la calidad de funcionamiento de cualquier método de estimación. A menudo, un análisis de la disposición espacial y temporal de los residuos indica nuevas mejoras del modelo de estimación.

## 5.10 ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS

Para abordar muchos problemas prácticos de la climatología es necesario conocer el comportamiento de los valores extremos de algunos elementos climatológicos. Esto se aplica particularmente en el caso del diseño técnico de estructuras que son sensibles a los valores altos o bajos de los fenómenos meteorológicos o climatológicos. Por ejemplo, las grandes cantidades de precipitación y el flujo fluvial resultante afectan a los sistemas de aguas residuales, las presas, los embalses y los puentes. La alta velocidad del viento aumenta la carga que pesa sobre edificios, puentes, grúas, árboles y líneas eléctricas. Las grandes nevadas obligan a construir techos que resistan el peso añadido. Es posible que las autoridades públicas y las aseguradoras deseen determinar a partir de qué umbrales se justifica prestar auxilio económico para aliviar los daños resultantes de condiciones extremas.

A menudo, los criterios de diseño se expresan en términos de un período de retorno, que es el intervalo de tiempo medio transcurrido entre dos ocurrencias de valores iguales o mayores que un valor dado. El concepto de período de retorno se utiliza para evitar adoptar coeficientes de seguridad altos que son muy costosos, pero también para prevenir daños mayores en los equipos y las estructuras como consecuencia de los fenómenos extremos que probablemente ocurran durante la vida útil de los mismos. Como dichos equipos pueden durar años o incluso siglos, la estimación exacta de los períodos de retorno puede ser un factor fundamental a la hora de diseñarlos. Los criterios de diseño también pueden determinarse en función del número de ocurrencias de fenómenos esperadas que exceden un umbral fijo.

### 5.10.1 Método del período de retorno

Los métodos clásicos de análisis de los valores extremos representan el comportamiento de la muestra de extremos mediante una distribución de probabilidad que se adapta suficientemente a la distribución observada. Las distribuciones de valores extremos conllevan supuestos como la estacionariedad y la independencia de los valores de los datos. Las tres distribuciones de valores extremos comunes son las de Gumbel, Fréchet y Weibull. La distribución de valores extremos generalizados combina estas tres en una misma función, que se caracteriza por un parámetro de forma del modelo.

Los datos que se modelizan mediante una distribución de valores extremos son los valores máximos (o mínimos) observados en un determinado intervalo de tiempo. Por ejemplo, si las temperaturas diarias se observan durante un período de muchos años, el conjunto de máximas anuales podría representarse mediante una distribución de valores extremos. Para establecer y representar adecuadamente un conjunto de máximas y mínimas a partir de subintervalos de todo el conjunto de datos, este ha de ser grande, lo cual puede ser una gran limitación si la muestra de datos abarca un período limitado. Puede optarse por la alternativa de elegir valores a partir de cierto umbral, lo que también se conoce como serie de duración parcial. La distribución de frecuencias generalizada de Pareto suele ser adecuada para ajustar datos que excedan un umbral. También pueden utilizarse técnicas de ajuste como la probabilidad máxima y los L-momentos.

Una vez que una distribución se ajuste a un conjunto de datos de valores extremos, se computan los períodos de retorno. Un período de retorno es la frecuencia media con la que se espera igualar o exceder un valor (como una vez en 20 años). Aunque pueden calcularse matemáticamente períodos de retorno largos respecto a la ocurrencia de un valor, el nivel de confianza que inspiran esos resultados puede ser mínimo. Por lo general, el nivel de confianza de un período de retorno disminuye rápidamente cuando el período supera en aproximadamente el doble la duración del conjunto de datos original.

Los fenómenos climáticos extremos pueden repercutir significativamente tanto en los sistemas naturales como en los de origen humano y, por lo tanto, es importante saber si los extremos climáticos están cambiando y de qué manera. Actualmente, algunos tipos de infraestructura tienen poco margen para atenuar las repercusiones del cambio climático. Por ejemplo, en todo el mundo hay muchas comunidades situadas en tierras costeras bajas que están expuestas al riesgo del ascenso del nivel del mar. Las estrategias de adaptación a los extremos climáticos no estacionarios deberían tener en cuenta los cambios a escala decenal en el clima observados en el pasado reciente, así como los cambios futuros que proyectan los modelos climáticos. Se han desarrollado modelos estadísticos más modernos, como el relativo al valor extremo generalizado no estacionario, para tratar de superar algunas de las limitaciones de las distribuciones más convencionales. A medida que los modelos continúen evolucionando y sus propiedades puedan comprenderse mejor, es probable que reemplacen a los métodos más comunes para analizar los extremos. En la publicación *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation* (WMO/TD-No. 1500) se ofrece mayor información sobre la forma de tener en cuenta un clima cambiante al evaluar y valorar los extremos.

### 5.10.2 Precipitación máxima probable

Se entiende por precipitación máxima probable la altura máxima teórica de la precipitación en un período dado que es físicamente posible en una zona de tempestad de una determinada dimensión bajo condiciones geográficas concretas en un momento específico del año. Es un dato que se usa ampliamente en el diseño de presas y otros grandes sistemas hidráulicos, para los que un fenómeno sumamente excepcional podría tener consecuencias nefastas.

Por lo general, la estimación de la precipitación máxima probable se basa en métodos heurísticos, que incluyen los siguientes pasos:

- a) representar, mediante un modelo conceptual de tormenta, procesos de precipitación en términos de elementos físicos tales como el punto de rocío de la superficie, la altura de la célula de la tormenta, el flujo de entrada y el flujo de salida;
- b) calibrar el modelo utilizando observaciones de la altura de la tormenta y la humedad atmosférica que la acompaña;
- c) estimar mediante un modelo calibrado lo que hubiera ocurrido si se observara una humedad atmosférica máxima, y
- d) transponer las características tormentosas observadas en los lugares objeto de medición al lugar donde se requieren las estimaciones, ajustando los efectos de la topografía, la continentalidad y condiciones no meteorológicas o no climatológicas similares.

### 5.11 ESTADÍSTICA ROBUSTA

La estadística robusta permite elaborar estimadores a los que no afectan indebidamente las pequeñas desviaciones de los supuestos de los modelos. Las deducciones estadísticas se basan en observaciones, así como en supuestos de los modelos subyacentes (tales como la aleatoriedad, la independencia y el ajuste de modelos). A menudo, los datos climatológicos no cumplen muchos de estos supuestos debido a la dependencia temporal y espacial de las observaciones, la falta de homogeneidad en los datos, errores en los datos y otros factores.

Al evaluar la validez de las conclusiones, debería determinarse, como mínimo, el efecto cualitativo y, de ser posible, el efecto cuantitativo de los supuestos en los resultados de los análisis. La finalidad con la que se realiza un análisis también es importante. A menudo, las conclusiones generales basadas en procesos temporales o espaciales a gran escala con muchos promedios y en conjuntos de datos voluminosos son menos sensibles a las desviaciones respecto de los supuestos que las conclusiones más específicas. Los métodos de estadística robusta se usan frecuentemente para la regresión.

Si los resultados son sensibles al incumplimiento de los supuestos, el analista debería indicar este hecho al difundir los resultados a los usuarios. También puede ser posible analizar los datos utilizando otros métodos que no sean tan sensibles a las desviaciones respecto de los supuestos, o que no presenten supuestos sobre los factores que causan los problemas de sensibilidad. Dado que los métodos paramétricos dan por sentado un mayor número de condiciones que los métodos no paramétricos, puede que sea posible reanalizar los datos con técnicas no paramétricas. Por ejemplo, la utilización de la mediana y el alcance intercuartil, en lugar de la media y la desviación típica, reduce la sensibilidad a los datos anómalos y a errores graves en los datos de observación.

### 5.12 PAQUETES ESTADÍSTICOS

Dado que la mayoría de los procesos y análisis climatológicos se basan en métodos estadísticos universales, los paquetes estadísticos universales son programas informáticos ventajosos para los climatólogos. Existen varios programas para el análisis estadístico universal en diversas plataformas informáticas.

Los paquetes estadísticos proporcionan muchas herramientas aplicables a la gestión, el análisis y la notificación de datos. El paquete que se elija debería tener toda la capacidad necesaria para gestionar, procesar y analizar datos, y no contener herramientas innecesarias que lo vuelvan ineficiente. A menudo, algunas de las herramientas básicas se incluyen en un Sistema de gestión de datos climáticos (véase el capítulo 3).

Las herramientas básicas de gestión de datos permiten realizar una gran variedad de operaciones con las que preparar los datos para proceder a su proceso y análisis. Estas operaciones consisten,

entre otras, en clasificar, añadir datos, hacer subconjuntos de datos, transponer matrices, efectuar cálculos aritméticos y fusionar datos. Las herramientas básicas de procesamiento estadístico comprenden el cálculo de estadísticas descriptivas de muestreo, correlaciones, tablas de frecuencias y pruebas de hipótesis. Normalmente, las herramientas analíticas satisfacen muchas de las necesidades en materia de análisis climáticos, tales como los análisis de la varianza, de la regresión, discriminantes, de conglomerados, pluridimensionales y de series temporales. Los resultados de los cálculos de los análisis suelen incorporarse a los conjuntos de datos resultantes y pueden guardarse, exportarse y transformarse y, por lo tanto, utilizarse para cualquier análisis o proceso ulterior.

Los paquetes estadísticos contienen herramientas gráficas para trazar gráficos bidimensionales o tridimensionales, editarlos y guardarlos en los formatos específicos de los paquetes estadísticos o en formatos gráficos normalizados. La mayoría de los paquetes permiten crear diagramas de dispersión (bidimensionales o tridimensionales); gráficos de burbujas; diagramas lineales, escalonados e interpolados (suavizados); gráficos verticales, horizontales y de sectores; diagramas de caja y bigotes, y gráficos de superficie tridimensionales, incluido el contorno de la superficie. Algunos paquetes contienen herramientas para representar los valores de cierto elemento en un mapa, pero no deberían considerarse una sustitución de un Sistema de Información Geográfica (SIG). En dicho Sistema se integran el soporte físico, los programas informáticos y los datos para recopilar, gestionar, analizar y representar todo tipo de información referenciada geográficamente. Algunos programas del SIG incluyen capacidades de interpolación geográfica como el cokrigado y las regresiones ponderadas geográficamente.

Las herramientas de análisis interactivo combinan las posibilidades que ofrecen los análisis estadísticos con la capacidad de gestionar visualmente las condiciones relativas a cualquier análisis estadístico específico. Las herramientas permiten elegir visualmente los valores que se incluirán en los análisis, o que se excluirán de ellos, y volver a hacer los cálculos de acuerdo a esa elección. Dicha flexibilidad es útil en los cálculos de tendencias cuando en la serie de datos climáticos existen datos anómalos y otros puntos sospechosos. Es posible excluir interactivamente estos puntos del análisis en función de un gráfico de la serie, y las estadísticas de las tendencias pueden volver a calcularse automáticamente. Normalmente, se dispone de opciones para analizar y visualizar subgrupos de datos.

### 5.13 MINERÍA DE DATOS

La minería de datos es un proceso analítico que tiene por objeto examinar grandes volúmenes de datos (macrodatos) para encontrar configuraciones constantes o relaciones sistemáticas entre los elementos, para luego validar las conclusiones aplicando las configuraciones detectadas a nuevos subconjuntos de datos. A menudo, se considera como una combinación de estadística, inteligencia artificial e investigación de bases de datos. Se está convirtiendo rápidamente en una esfera importante en la que se están logrando avances teóricos y prácticos considerables. La minería de datos puede aplicarse plenamente a los problemas climatológicos cuando se disponga de un gran volumen de datos y las maneras de buscar relaciones significativas entre los elementos climáticos no resulten evidentes, especialmente en la fase inicial de los análisis.

La minería de datos se asemeja al análisis exploratorio de los datos, que también está orientado hacia la búsqueda de relaciones entre elementos en situaciones en las que las relaciones posibles no resultan claras. La minería de datos no se ocupa de determinar las relaciones específicas entre los elementos participantes, sino que se centra en ofrecer una solución que pueda conducir a predicciones útiles. La minería de datos adopta un enfoque de "caja negra" con respecto a la exploración de datos o el descubrimiento de conocimientos y, además de técnicas exploratorias de análisis de datos tradicionales, también utiliza técnicas como las redes neuronales, que pueden generar predicciones válidas, pero no pueden determinar las características específicas de las interrelaciones entre los elementos en los que se basan las predicciones.

## REFERENCIAS

- Organización Meteorológica Mundial, 1966: *Some Methods in Climatological Analysis* (WMO/TN-No. 81, WMO-No. 199). Ginebra.
- , 1990: *On the Statistical Analysis of Series of Observations* (WMO/TN-No. 143, WMO-No. 415). Ginebra.
- , 1994: *Guía de aplicaciones de climatología marina* (OMM-Nº 781). Ginebra.
- , 2003: *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WCDMP-No. 53, WMO/TD-No. 1186). Ginebra.
- , 2009: *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation* (WCDMP-No. 72, WMO/TD-No. 1500). Ginebra.

## LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- Acharya, N., A. Frei, J. Chen, L. De Cristofaro y E.M. Owens, 2017: "Evaluating Stochastic Precipitation Generators for Climate Change Impact Studies of New York City's Primary Water Supply", en *Journal of Hydrometeorology*, 18 (3):879-896, doi:10.1175/JHM-D-16-0169.1.
- Ailliot, P., D. Allard, V. Monbet y P. Naveau, 2015: "Stochastic weather generators: an overview of weather type models", en *Journal de la Société Française de Statistique*, 156 (1):101-113.
- Alexandersson, H., 1986: "A homogeneity test applied to precipitation data", en *International Journal of Climatology*, 6:661-675.
- Angel, J.R., W.R. Easterling y S.W. Kirtsch, 1993: "Towards defining appropriate averaging periods for climate normal", en *Climatological Bulletin*, 27:29-44.
- Beljaars, A.C.M., L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Hólm, B.J. Hoskins, L. Isaksen, P.A.E.M. Janssen, R. Jenne, A.P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N.A. Rayner, R.W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K.E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo y J. Woollen, 2005: "The ERA-40 reanalysis", en *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131:2961-3012.
- Bénichou, P. y O. Le Breton, 1987: "Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques", en *La Météorologie*, 7(19):23-34.
- Burrough, P.A., 1986: *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Monographs on Soil and Resources Survey No. 12. Oxford, Oxford University Press.
- Cook, E.R., K.R. Briffa y P.D. Jones, 1994: "Spatial regression methods in dendroclimatology: A review and comparison of two techniques", en *International Journal of Climatology*, 14:379-402.
- Daley, R., 1993: *Atmospheric Data Analysis*. Nueva York, Cambridge University Press.
- Dalgaard, P., 2002: *Introductory Statistics with R*. Nueva York, Springer.
- Daly, C., R.P. Neilson y D.L. Phillips, 1994: "A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain", en *Journal of Applied Meteorology*, 33:140-158.
- Della-Marta, P.M. y H. Wanner, 2006: "Method of homogenizing the extremes and mean of daily temperature measurements", en *Journal of Climate*, 19:4179-4197.
- Deutsch, C.V. y A.G. Journel, 1998: *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, segunda edición. Oxford, Oxford University Press.
- Dixon, K.W. y M.D. Shulman, 1984: "A statistical evaluation of the predictive abilities of climatic averages", en *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23:1542-1552.
- Domonkos, P. y J. Coll, 2017: "Homogenisation of temperature and precipitation time series with ACMANT3: method description and efficiency tests", en *International Journal of Climatology*, 37(4):1910-1921.
- Donat, M.G., L.V. Alexander, H. Yang, I. Durre, R. Vose, R.J.H. Dunn, K.M. Willett, E. Aguilar, M. Brunet, J. Caesar, B. Hewitson, C. Jack, A.M.G. Klein Tank, A.C. Kruger, J. Marengo, T.C. Peterson, M. Renom, C. Oria Rojas, M. Rusticucci, J. Salinger, A.S. Elayah, S.S. Sekele, A.K. Srivastava, B. Trewin, C. Villarreal, L.A. Vincent, P. Zhai, X. Zhang, S. Kitching, 2013: "Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset", en *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118:2098-2118, doi:10.1002/jgrd.50150.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2008: *ArcGIS Geographical Information System*. Redlands.
- Fisher, R.A. y L.H.C. Tippett, 1928. "Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample", en *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 24:180-190.



- Frich, P., L.V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A.M.G. Klein Tank y T. Peterson, 2002: "Global changes in climatic extreme events during the second half of the 20th century", en *Climate Research*, 19:193–21.
- Gabor, D., 1946: Theory of communication. *J. IEEE*, 93:429–457.
- Gandin, L., 1963: *Objective Analysis of Meteorological Fields*. Leningrado, Hydrometeoizdat, en ruso (traducción al inglés: Programa israelí para la traducción científica, Jerusalén, 1965).
- Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones y M. New, 2008: "A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation for 1950–2006", en *Journal of Geophysical Research*, 113: D20119, doi:10.1029/2008JD010201.
- Heino, R., 1994: *Climate in Finland During the Period of Meteorological Observations*. Contributions, No. 12. Helsinki, Instituto meteorológico finlandés.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 1997: *An Introduction to Simple Climate Models used in the IPCC Second Assessment Report: IPCC Technical Paper II* (J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, D.J. Griggs y K. Maskell, eds.). Ginebra.
- International ad hoc Detection and Attribution Group (IDAG), 2005: "Detecting and attributing external influences on the climate system: A review of recent advances", en *Journal of Climate*, 18:1291–1314.
- Jenkinson, A.F., 1955: "The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements", en *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81:158–171.
- Jones, P.D., S.C.B. Raper, B. Santer, B.S.G. Cherry, C. Goodess, P.M. Kelly, T.M.L. Wigley, R.S. Bradeley y H.F. Diaz, 1985: *A Grid Point Surface Air Temperature Data Set for the Northern Hemisphere*, DOE/EV/10098-2. Departamento de Energía de Estados Unidos, Washington, D.C.
- Jones, P.D., E.B. Horton, C.K. Folland, M. Hulme y D.E. Parker, 1999: "The use of indices to identify changes in climatic extremes", en *Climatic Change*, 42:131–149.
- Jureckova, J. y J. Picek, 2006: *Robust Statistical Methods with R*. Boca Raton, Chapman and Hall/CRC.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deavan, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woolen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne y D. Joseph, 1996: "The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77:437–471.
- Kaplan, A., Y. Kushnir, M. Cane y M. Blumenthal., 1997: "Reduced space optimal analysis for historical datasets: 136 years of Atlantic sea surface temperatures", en *Journal of Geophysical Research*, 102:27835–27860.
- Karl, T.R., C.N. Williams Jr y P.J. Young, 1986: "A model to estimate the time of observation bias associated with monthly mean maximum, minimum, and mean temperatures for the United States", en *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25:145–160.
- Kharin, V.V. y F.W. Zwiers, 2005: "Estimating extremes in transient climate change simulations", en *Journal of Climate*, 18:1156–1173.
- Kohler, M.A., 1949: "Double-mass analysis for testing the consistency of records for making adjustments", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 30:188–189.
- Mann, M. E., 2004: "On smoothing potentially non-stationary climate time series", en *Geophysical Research Letters*, 31:L07214, doi:10.1029/2004GL019569.
- Mehan, S., T. Guo, M.W. Gitau, D.C. Flanagan, 2017: "Comparative study of different stochastic weather generators for long-term climate data simulation", en *Climate*, 5 (2), artículo nº 26, doi:10.3390/cli5020026.
- Centro Nacional de Datos Climáticos de Estados Unidos (NCDC), 2006: *Second Workshop on Climate Data Homogenization*, Centro Nacional de Datos Climáticos (Asheville, Carolina del Norte, 28 a 30 de marzo de 2006), organizado conjuntamente por la División de investigación climática del Ministerio del Medio ambiente de Canadá y el Centro Nacional de Datos Climáticos de la NOAA.
- Palus, M. y D. Novotna, 2006: "Quasi-biennial oscillations extracted from the monthly NAO index and temperature records are phase-synchronized", en *Nonlinear Processes in Geophysics*, 13:287–296.
- Peterson, T.C., D.R. Easterling, T.R. Karl, P. Groisman, N. Nicholls, N. Plummer, S. Torok, I. Auer, R. Boehm, D. Gullett, L. Vincent, R. Heino, H. Tuomenvirta, O. Mestre, T. Szentimrey, J. Salinger, E.J. Forland, I. Hanssen-Bauer, H. Alexandersson, P. Jones, y D. Parker, 1998: "Homogeneity adjustments of *in situ* atmospheric climate data: a review", en *International Journal of Climatology*, 18:1493–1517.
- Peterson, T.C., C. Folland, G. Gruza, W. Hogg, A. Mokssit y N. Plummer, 2001: *Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998–2001*. International CLIVAR Project Office (ICPO) Publication Series, 48. Southampton, Reino Unido.

- Peterson, T. C. y otros, 2002: "Recent changes in climate extremes in the Caribbean Region", en *Journal of Geophysical Research*, 107(D21):4601.
- Philipp, A., P.M. Della-Marta, J. Jacobeit, D.R. Fereday, P.D. Jones, A. Moberg y H. Wanner, 2007: "Long-term variability of daily North Atlantic–European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering", en *Journal of Climate*, 20:4065–4095.
- Ribeiro, S., J. Caineta y A. Costa, 2016: "Review and discussion of homogenisation methods for climate data", en *Physics and Chemistry of the Earth*, 94: 167-179.
- Ribeiro, S., J. Caineta, A.C. Costa, R. Henriques, 2017: "GSIMCLI: A geostatistical procedure for the homogenisation of climatic time series", en *International Journal of Climatology*, 37 (8):3452-3467.
- Schnase, J.L., T.J. Lee, C.A. Mattmann, C.S. Lynnes, L. Cinquini, P.M. Ramirez, A.F. Hart, D.N. Williams, D. Waliser, P. Rinsland, W.P. Webster, D.Q. Duffy, M.A. Mcinerney, G.S. Tamkin, G.L. Potter y L. Carrier, 2016: "Big data challenges in climate science: Improving the next-generation cyberinfrastructure", en *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4 (3):10-22, doi:10.1109/MGRS.2015.2514192.
- Sen, P.K., 1968: "Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau", en *Journal of the American Statistical Association*, 63:1379–1389.
- Sensoy, S., T.C. Peterson, L.V. Alexander y X. Zhang, 2007: "Enhancing Middle East climate change monitoring and indices", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88:1249–1254.
- Shabbar, A. y A.G. Barnston, 1996: "Skill of seasonal climate forecasts in Canada using canonical correlation analysis", en *Monthly Weather Review*, 124(10):2370–2385.
- Torrence, C. y G.P. Compo, 1998: "A practical guide to wavelet analysis", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79:61–78.
- Ulbrich, U. y M. Christoph, 1999: "A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing", en *Climate Dynamics*, 15:551–559.
- Uppala, S.M., P.W. Kållberg, A.J. Simmons, U. Andrae, V. da Costa Bechtold, M. Fiorino, J.K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G.A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R.P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M.A. Balmaseda, Vincent, L.A., X. Zhang, B.R. Bonsal y W.D. Hogg, 2002: "Homogenization of daily temperatures over Canada", en *Journal of Climate*, 15:1322–1334.
- von Storch, H. y F.W. Zwiers, 1999: *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Wackernagel, H., 1998: "Kriging, cokriging and external drift", en *Workshop on Dealing with Spatialisation* (B. Gozzini y M. Hims, eds.). Toulouse, Acción 79 de la COST de la Unión Europea.
- Wahba, G. y J. Wendelberger, 1980: "Some new mathematical methods for variational objective analysis using splines and cross-validation", en *Monthly Weather Review*, 108:36–57.
- Wang, X.L. y V. R. Swail, 2001: "Changes of extreme wave heights in Northern Hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes", en *Journal of Climate*, 14:2204–2221.
- Wang, X.L., 2008: "Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test", en *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47:2423–2444.
- Wilks, D.S., 2002: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, segunda edición. Nueva York, Academic Press.
- Willmott, C.J. y S. Robeson, 1995: "Climatologically aided interpolation (CAI) of terrestrial air-temperature", en *International Journal of Climatology*, 15 (2):221-229.
- Yozgatligil, C. y C. Yazici, 2016: "Comparison of homogeneity tests for temperature using a simulation study", en *International Journal of Climatology*, 36 (1):62-81, doi:10.1002/joc.4329.
- Yue, S., P. Pilon y G. Cavadas, 2002: "Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series", en *Journal of Hydrology*, 259:254–271.
- Zhang, X., E. Aguilar, S. Sensoy, H. Melkonyan, U. Tagiyeva, N. Ahmed, N. Kutladze, F. Rahimzadeh, A. Taghipour, T.H. Hantosh, P. Albert, M. Semawi, M. Karam Ali, M. Halal Said Al-Shabibi, Z. Al-Oulan, Taha Zafari, I. Al Dean Khelet, S. Hammoud, M. Demircan, M. Eken, M. Adiguzel, L. Alexander, T. Peterson y Trevor Wallis, 2005: "Trends in Middle East climate extremes indices during 1930–2003", en *Journal of Geophysical Research*, 110:D22104, doi:10.1029/2005JD006181.



## **CAPÍTULO 6. LOS PRODUCTOS CLIMÁTICOS Y SU DIFUSIÓN**

### **6.1 DIRECTRICES GENERALES**

Los productos climáticos son paquetes de información que incluyen datos, resúmenes, tablas, gráficos, mapas, informes y análisis. Las distribuciones espaciales pueden representarse mediante mapas. En otros productos más complejos, como los atlas o análisis climáticos, pueden combinarse varios tipos de visualización con textos descriptivos. También pueden existir bases de datos dotadas de herramientas informáticas con las que los clientes en línea pueden elaborar estadísticas y visualizaciones de acuerdo con sus necesidades.

Los productos y los datos en los que se basan dichos productos deberían ser de la mejor calidad posible dentro de las limitaciones temporales para ofrecer la información. Se ha insistido mucho y se insiste cada vez más en que los productos relacionados con el clima se suministren lo más rápidamente posible tras el período de agregación. El mantenimiento del nivel de calidad de dichos productos es motivo de preocupación. El breve período que transcurre entre la observación y la entrega a un usuario deja poco o ningún tiempo para someter los datos a un control de calidad aparte del que se puede hacer automáticamente. Como mínimo, deberían efectuarse ciertas verificaciones básicas a medida que se vayan recibiendo los datos (véase el capítulo 3). Se debe advertir a los usuarios de los posibles problemas que pueden presentar los datos y, dado que estos productos suelen entregarse automáticamente, dichas advertencias deberían ir incluidas en los productos. Un sistema de aseguramiento de la calidad apropiado ofrecerá un marco que permita el tratamiento de esta información junto con los datos.

Los productos referentes a los datos históricos deberían ser de mejor calidad que los que usan datos muy recientes. Todos los datos que contribuyen al registro climático deberían controlarse para verificar posibles errores aleatorios y sistemáticos, su homogeneidad, su representatividad espacial y lagunas en las series temporales. Por lo que se refiere a productos tales como los atlas climáticos o los reglamentos técnicos, los datos deberían corresponder a un período de referencia estándar (véase la sección 4.8). Deberían evitarse las revisiones frecuentes basadas en nuevos períodos de registro. Si parte del contenido de un producto no se mantiene estable durante un largo período de tiempo, es necesario proporcionar información adicional que indique las características de la variabilidad o el cambio.

Las tablas históricas o estadísticas de datos climatológicos pueden resultar más útiles si se incluye un texto justificativo que ayude al usuario a interpretar los datos y que destaque los elementos climatológicos más importantes. En todas las publicaciones, deberá incluirse información y datos suficientes sobre la ubicación y la altitud de las estaciones de observación, la homogeneidad de los datos procedentes de todas las estaciones, los períodos de registro utilizados y los procedimientos estadísticos o analíticos empleados.

La presentación de los productos debería verificarse cuidadosamente antes de ponerlos a disposición de los posibles usuarios. Por ejemplo, los mapas climáticos deberían estar bien trazados, con colores y escalas escogidos cuidadosamente, títulos claros y notaciones en el mapa de lo que se está analizando, indicaciones del período de registro de datos y una lista de las organizaciones pertinentes. Los mapas deben ser suficientemente coherentes (en cuanto a colores, trazado y datos) para que resulte fácil compararlos.

Se recomienda consultar a todos aquellos que tengan que ver con los servicios de información medioambiental. La información aportada por las partes interesadas debería tomarse en consideración al crear, modificar o discontinuar productos y servicios.

#### **6.1.1 Publicaciones periódicas sobre los datos climatológicos**

Una publicación climatológica periódica es aquella que se elabora y publica regularmente a intervalos de tiempo fijos. La mayoría de las publicaciones periódicas son mensuales o anuales.

Sin embargo, también hay servicios cuyas publicaciones son semanales o estacionales. Las publicaciones semanales o mensuales se editan inmediatamente después de finalizar el período en cuestión y normalmente incluyen datos recientes que no se han sometido a controles de calidad exhaustivos. Estas publicaciones facilitan información oportuna que puede resultar muy importante para diversos sectores económicos, sociales y medioambientales y, por eso, son valiosas aunque los datos puedan contener algunos errores u omisiones. A menudo, las publicaciones periódicas de datos estacionales o trimestrales se usan para dar a conocer resúmenes de datos estacionales como la caída de nieve en el invierno, la precipitación durante el período de crecimiento, los grados-día de refrigeración durante el verano y los grados-día durante el invierno.

La mayoría de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) publican boletines mensuales con datos relativos a varias estaciones ubicadas en determinadas zonas o provincias o en todo el país. Cuando se publican al cabo de una o dos semanas de haber finalizado cada mes, estos boletines suelen incluir datos recientes que tal vez no se hayan sometido a un control de calidad completo, pero si se publican después de un mes o incluso más tarde, todos los datos deberían cumplir las normas de control de calidad habituales aplicables a los datos climatológicos históricos. Deberían indicarse la temperatura máxima y mínima y la precipitación total de cada día, así como tal vez las temperaturas registradas a horas fijas, junto con los valores asociados de humedad. También podrían incluirse datos sobre la velocidad media diaria del viento y la dirección dominante, la duración efectiva de la insolación, u otros datos importantes a nivel local (como los grados-día de calefacción, refrigeración y crecimiento). Las medias mensuales, los extremos y otros datos estadísticos de todas las estaciones también deberían indicarse cuando estén disponibles.

Si bien la mayoría de los boletines mensuales contienen solo datos climatológicos de superficie, algunos SMHN incluyen una selección de datos básicos de estaciones en altitud o publican boletines mensuales separados con datos de observaciones en altitud. En dichos boletines mensuales suelen publicarse los promedios diarios y mensuales relativos a las superficies de presión normales. Los datos suelen incluir la altitud (en metros geopotenciales), la temperatura, la humedad y la velocidad y dirección del viento de uno o dos sondeos diarios.

Algunas de las publicaciones climatológicas más útiles son las que incluyen tablas sencillas de los valores mensuales y anuales de la temperatura media diaria y la precipitación total. Dichas tablas son elaboradas por los SMHN y se facilitan en forma manuscrita o electrónica. Los servicios deberían publicar, al menos una vez por decenio, un conjunto completo de datos climatológicos estadísticos relativos a determinadas estaciones representativas.

Las publicaciones periódicas patrocinadas por la OMM incluyen datos proporcionados por los Miembros. Como ejemplo, cabe citar las publicaciones *Monthly Climatic Data for the World* (Datos climáticos mensuales para el mundo), que contiene datos de todas las estaciones CLIMAT; *World Weather Records* (Registros meteorológicos mundiales), que incluye valores mensuales, anuales e históricos de estaciones individuales respecto a la presión de la estación, la presión a nivel del mar, la temperatura y la precipitación; y *Marine Climatological Summaries* (Resúmenes de climatología marina), que contiene estadísticas climatológicas mensuales, anuales y decenales y mapas de los océanos.

Desde 1993, la OMM, a través de la Comisión de Climatología y en colaboración con sus Miembros, emite también declaraciones anuales sobre el estado del clima mundial para aportar información científica creíble sobre el clima y su variabilidad.

Una publicación mensual útil, en especial para los diagnósticos relativos a El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y otras teleconexiones climáticas, es *Climate Diagnostics Bulletin* (Boletín de diagnóstico climático) publicado por el Centro de Predicción Climática de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA) de los Estados Unidos.

### 6.1.2 Publicaciones esporádicas

A diferencia de las publicaciones periódicas de datos climáticos, que se elaboran conforme a un calendario, las publicaciones esporádicas se preparan cuando son necesarias. Estas publicaciones se preparan de tal forma que satisfagan las necesidades de numerosos usuarios durante un tiempo considerable, de modo que no sea necesario actualizarlas frecuentemente. Las publicaciones esporádicas están destinadas a aquellos usuarios que necesitan información al planificar inversiones de capital o diseñar equipos y construcciones pensados para que duren decenios o siglos; a miembros del público en general cuyos intereses sean académicos o meramente casuales; y a investigadores del ámbito de las ciencias atmosféricas y oceánicas. También tienen por objeto resumir y explicar fenómenos inusuales, como los fenómenos meteorológicos extremos, y describir o actualizar un fenómeno previsto importante, como un episodio intenso de El Niño. El contenido y formato de una determinada publicación esporádica debe reflejar los intereses y las necesidades de los usuarios a quienes va dirigida.

Las series continuas y homogéneas a largo plazo de datos son de gran valor para los estudios climatológicos comparativos y para la investigación de las fluctuaciones, tendencias y cambios del clima. Varios SMHN han publicado series de ese tipo relativas a determinadas estaciones en las que los métodos de observación y el entorno natural prácticamente no han experimentado cambios durante mucho tiempo. Las series de datos más comúnmente disponibles y con mayor demanda son las de la temperatura y la precipitación, aunque pueden publicarse también datos sobre el viento, la presión, la insolación efectiva, la nubosidad y otros elementos climáticos. Algunos SMHN incluyen series de datos climatológicos históricos en sus anuarios o boletines anuales. Las monografías sobre el clima de un país o una zona son útiles para una amplia gama de usuarios y deberían publicarse y actualizarse periódicamente. Es conveniente que las publicaciones y los datos también estén disponibles en formato electrónico para facilitar su consulta e intercambio.

La recopilación de mapas en un atlas también es una publicación esporádica valiosa. Las claves y leyendas de los mapas climáticos deberían incluir información precisa sobre el elemento representado, alguna indicación de la cantidad de estaciones que han proporcionado los datos y el período de registro escogido para elaborar cada mapa o diagrama.

### 6.1.3 Productos genéricos

Aunque los productos especialmente adaptados a los distintos usuarios tal vez sean la mejor opción para dichos usuarios, normalmente es ventajoso desarrollar un producto genérico que pueda utilizar una amplia gama de usuarios. Por ejemplo, tanto las entidades que gestionan recursos energéticos como los fruticultores pueden usar un producto de grados-día. Cuando el contenido, formato y diseño de un producto se escogen cuidadosamente, los costos de elaboración pueden repartirse entre muchos usuarios. Dichos productos genéricos permiten salvar la brecha entre las publicaciones periódicas de datos climáticos y las adaptadas especialmente los distintos usuarios. Los productos genéricos deberían desarrollarse en el ámbito local para responder a las necesidades de distintos grupos de usuarios.

Los productos se solicitan y entregan cada vez más por Internet. La interfaz de usuario con esos sistemas puede considerarse otro producto del servicio climático y la normalización de esa interfaz puede percibirse como una mejora de la calidad y utilidad del producto.

### 6.1.4 Productos especializados

A menudo, es necesario desarrollar productos específicos para un usuario o un sector. Las necesidades particulares de un grupo de usuarios no siempre coinciden con las de otros grupos, por lo que no se justifica el costo de publicar el producto para su distribución general.

Dichos productos de climatología aplicada se adaptan a las necesidades de un usuario o de un grupo de usuarios en particular. Estos productos permiten salvar la brecha entre los datos observados y las necesidades específicas de un usuario, ya que transforman las observaciones

en un producto con valor añadido para destinatarios concretos. Desarrollar estos productos implica analizar los datos y presentar la información destacando las descripciones detalladas que permitirán al usuario beneficiarse al máximo de la aplicación de la información. Normalmente, la utilización que se hace del producto determina los tipos de análisis y transformaciones de datos necesarios y los métodos de entrega del producto.

El servicio climático debería poder aceptar solicitudes de productos especializados y desarrollar los productos conforme a las exigencias de los usuarios, lo que requerirá poner en práctica todas las técnicas de interacción con los usuarios y de comercialización antes mencionadas. Aunque el producto no esté destinado al público en general, los usuarios esperarán como mínimo el mismo nivel de calidad tanto en el contenido como en la presentación.

Un ejemplo de producto impulsado por las aplicaciones es el de los datos sobre grados-hora diarios que requiere un fruticultor para administrar el uso de pesticidas contra la enfermedad del fuego bacteriano. Cuando solo se dispone de temperaturas máximas y mínimas de los lugares de interés, los grados-día pueden calcularse a partir del promedio de los valores máximos y mínimos. Dado que se requieren grados-hora, pero no se dispone de ellos, es necesario hacer un análisis para establecer relaciones entre grados-día calculados a partir de los datos de las temperaturas extremas diarias y los grados-hora. También deben evaluarse las condiciones para las que las relaciones son válidas y el grado de error de las relaciones. Una vez que se establezcan las relaciones, se le puede entregar al usuario un producto que contenga grados-hora, aun cuando estos no se midan directamente.

Otro ejemplo es el del análisis de las crecidas. La inundación es un fenómeno natural y varía en escala desde la escorrentía que se produce en una ladera saturada hasta el desbordamiento de grandes ríos. Las repercusiones de las crecidas comprenden desde el encharcamiento de campos y la obstrucción del paso por carreteras hasta la inundación generalizada de casas y locales comerciales y, ocasionalmente, la pérdida de vidas. Las estimaciones de la frecuencia de las crecidas son necesarias para la planificación y evaluación de las medias de protección, el diseño de estructuras como puentes, alcantarillas y aliviaderos de embalses, y el trazado de mapas sobre el riesgo de crecidas para la planificación relativa a nuevas construcciones y los servicios de seguros. Un producto que indica la probabilidad de las cantidades de precipitación observadas es un elemento necesario para las estimaciones de las frecuencias de las crecidas. La elaboración de la información sobre el riesgo de precipitación implica el análisis estadístico de valor añadido (véase el capítulo 5) de los datos sobre la precipitación observada que suelen presentarse en resúmenes genéricos. Si los análisis de riesgo resultantes fueran útiles para varios usuarios diferentes, podría justificarse una publicación general.

#### 6.1.5 **Productos para la vigilancia del clima**

La vigilancia de la variabilidad que experimenta el clima en todo el mundo es un objetivo del Programa Mundial de Datos y Vigilancia del Clima (PMDVC). La conservación y accesibilidad con respecto a información y datos climáticos por parte de un servicio climático ayuda a lograr este objetivo del Programa. Para vigilar y analizar el clima de un país, es necesario comprender las condiciones climáticas presentes en dicho país como parte del sistema climático mundial. Además de la vigilancia de los climas locales para responder a los intereses nacionales y relacionar los episodios actuales con las pautas históricas, el servicio climático debería tratar de situar las variaciones locales en un contexto regional más amplio o incluso mundial.

La observación y vigilancia del clima puede estar a cargo de más de un organismo nacional. Cuando un organismo publica datos de observación, resultados analíticos y datos estadísticos, los productos suelen presentarse en formatos que se adecúan a los propios objetivos del organismo. Por lo tanto, es posible que los productos no sean necesariamente apropiados para que los usen otros organismos. Además, tal vez a los distintos usuarios no les resulte fácil escoger productos que respondan a sus propias necesidades entre los productos de vigilancia climática distribuidos por diversos organismos, ni armonizar un conjunto de productos dispares con el fin de comprender plenamente el sistema climático. Para muchos usuarios también es difícil comprender la relación que existe entre las características del sistema climático mundial y las condiciones climáticas reinantes en su propio país. Así pues, el servicio climático debería procesar

sus propios datos y resultados de los análisis y, de ser posible, reunirlos junto con el material de otros organismos para ofrecer un conjunto de productos que puedan difundirse rápidamente con la opinión de cada organismo sobre las condiciones climáticas reinantes en ese momento.

Si en un determinado país no se dispone de los datos necesarios, el SMHN correspondiente debería obtener datos y análisis regionales o mundiales de organismos extranjeros o internacionales y procesar la información de tal manera que pueda utilizarse desde el nivel local al nacional. Sin embargo, el SMHN debería añadir sus propias observaciones a estos análisis mundiales sobre la relación entre las condiciones climáticas locales y los campos climáticos a gran escala. Para las actividades de vigilancia es necesario que el servicio climático desarrolle la capacidad suficiente para analizar el estado del clima tanto pasado como presente y las teleconexiones de la escala mundial a la regional, y proporcione información resumida a los usuarios de los sectores público y privado. Para las predicciones y actualizaciones relativas al clima es fundamental contar con productos de vigilancia de buena calidad.

### 6.1.6 Índices

A menudo, el uso de índices permite al usuario comprender de manera simple y rápida los patrones climáticos históricos (véase la sección 4.4.6). Los índices climáticos se usan ampliamente para describir los rasgos del clima, lo que permite predecir el clima, y para detectar el cambio climático. Los índices pueden referirse a una estación climatológica en particular o indicar cierto rasgo climático de una zona. Por lo general, los índices combinan varios elementos para describir, por ejemplo, sequías, la continentalidad, fases fenológicas de las plantas, grados-día de calefacción, regímenes de la circulación a gran escala y teleconexiones. Al facilitar información a los usuarios, a menudo es necesario que el servicio climático interprete el significado del valor de un índice, cambios en los valores a lo largo del tiempo y, a veces, los procedimientos de cálculo. Como ejemplos de índices cabe citar el índice de ENOS; el índice de la Oscilación del Atlántico Norte; indicadores tales como el índice de humedad disponible, utilizado para buscar estrategias de planificación de los cultivos; índices agrometeorológicos tales como el índice de gravedad de la sequía de Palmer, el índice de aridez y el índice de superficie foliar, que se emplean para indicar y vigilar la humedad disponible, y el índice medio del monzón, referente a zonas de sequía y de crecidas. La elaboración y evaluación de índices propios de la detección del cambio climático, la variabilidad del clima y los extremos climáticos son procesos continuos, como se indica en la publicación *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation* (WMO/TD-No. 1500, WCDMP-No. 72).

## 6.2 DATOS RETICULADOS

Los productos basados en datos climáticos reticulados son valores de variables climáticas en superficie o en altitud (por ejemplo, la temperatura del aire, la humedad atmosférica o la temperatura de la superficie del mar) o índices climáticos (por ejemplo, el número de días de heladas) dispuestos en una retícula regular que abarca desde el nivel local a los niveles regional y mundial. Además de la escala abarcada, la resolución de los datos reticulados puede variar desde una superficie reducida de unos pocos metros cuadrados, en el caso de los conjuntos de datos suburbanos, a superficies de entre 200 km y 300 km, como sucede en los conjuntos de datos a escala mundial. Asimismo, la resolución temporal puede variar de períodos inferiores a una hora a una escala temporal anual.

Los datos climáticos reticulados son, en esencia, una alternativa a las mediciones instrumentales, con independencia de que se hayan obtenido a partir de observaciones originales utilizando técnicas de interpolación (véase la sección 5.9) o de los resultados de modelos climáticos numéricos o estadísticos, de modo que suelen estar sujetos a validación. Para realizar esta validación, los datos se cotejan con las observaciones de las estaciones climáticas en superficie o en altitud que, o bien coinciden con un punto concreto de la retícula o bien se encuentran próximas a ese punto.

En la elaboración de conjuntos de datos climáticos reticulados participan diversos tipos de organizaciones, por ejemplo, centros climáticos nacionales o regionales y grupos de investigación de universidades. Algunos conjuntos de datos se actualizan regular o periódicamente, mientras que otros pueden ser estáticos o contener series temporales de variables climáticas.

Los conjuntos de datos reticulados facilitan el análisis espacial de las variables climáticas y la visualización estática o dinámica de las configuraciones y las tendencias climáticas.

### 6.2.1 Conjuntos de datos reticulados basados en observaciones

Es consabido que los análisis climatológicos pueden verse frustrados por la discontinuidad de los datos tanto en el espacio como en el tiempo; esto se debe a que las observaciones climáticas presentan una distribución geográfica y temporal irregular. Desde hace aproximadamente un decenio, no solo los sistemas de reanálisis han abierto nuevas posibilidades para el análisis del clima (véase la sección 6.2.4), sino que la disponibilidad de conjuntos de datos climáticos reticulados basados en observaciones ha contribuido a dar solución a algunos de los problemas derivados del carácter incompleto de los datos observados. Aunque algunos de los conjuntos de datos climáticos reticulados basados en observaciones se sirven exclusivamente de observaciones de superficie, otros son conjuntos de datos combinados que incluyen observaciones procedentes tanto de estaciones en superficie como de plataformas satelitales. Los conjuntos de datos climáticos reticulados basados en observaciones suelen incluir valores interpolados procedentes de estaciones para las que los datos se han ajustado y homogeneizado.

En la tabla 6.1. se ofrecen algunos ejemplos de conjuntos de datos reticulados mundiales y regionales basados en observaciones.

**Tabla 6.1. Ejemplos de conjuntos de datos reticulados mundiales y regionales basados en observaciones**

| <i>Conjunto mundial de datos</i>                                                                       | <i>Variables</i>                                                                    | <i>Cobertura temporal</i>                                                                                                                                                                                       | <i>Cobertura espacial</i>                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Análisis Combinado de las Precipitaciones (CMAP) del Centro de Predicción Climática (CPC) <sup>a</sup> | Valores reticulares medios mensuales y pentadales de precipitación a escala mundial | Valores mensuales: enero de 1979 a septiembre de 2017<br><br>Valores pentadales: enero de 1979 a 27 de diciembre de 2016<br><br>Promedio mensual climatológico derivado de los datos del período de 1981 a 2010 | Retícula mundial de 2,5 grados de latitud x 2,5 grados de longitud         |
| Humedad del suelo del CPC <sup>a</sup>                                                                 | Humedad del suelo                                                                   | Valores medios mensuales: enero de 1948 a agosto de 2017, incluido<br><br>Promedio mensual climatológico derivado de los datos del período de 1981 a 2010                                                       | Retícula mundial de 0,5 grados de latitud x 0,5 grados de longitud         |
| CRU TS v. 4.01 <sup>b</sup>                                                                            | pre, tmp, tmx, tmn, dtr, vap, cld, wet, frs, pet                                    | Series temporales de 1901 a 2016                                                                                                                                                                                | Todas las zonas terrestres, 0,5 grados de latitud x 0,5 grados de longitud |
| Retícula mundial longitudinal CRU CY v. 4.01 <sup>b</sup>                                              | pre, tmp, tmx, tmn, dtr, vap, cld, wet, frs, pet                                    | Valores medios: de 1901 a 2015                                                                                                                                                                                  | Países                                                                     |



| <i>Conjunto mundial de datos</i>                                                                                                                                                   | <i>Variables</i>                                                                                                                                                                                                              | <i>Cobertura temporal</i>                                                                                                                                                                                                                                                                      | <i>Cobertura espacial</i>                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Datos reticulados de anomalías de las precipitaciones terrestres (versión 2) y la temperatura (versión 3) de la Red mundial de datos climatológicos históricos (GHCN) <sup>c</sup> | Precipitaciones y temperatura mensuales                                                                                                                                                                                       | Anomalías mensuales: de 1900 a mayo de 2015 (precipitaciones)<br><br>De 1880 a julio de 2016 (temperatura)<br><br>Promedio mensual de 1900 a mayo de 2015 (solamente precipitaciones)                                                                                                          | Retícula mundial de 5,0 grados de latitud x 5,0 grados de longitud                                                                                                                                                     |
| Datos reticulados de la temperatura a 2m (terrestre) de la GHCN y el Sistema de Vigilancia de las Anomalías del Clima (CAMS) <sup>d</sup>                                          | Temperaturas de la superficie terrestre analizadas a nivel mundial                                                                                                                                                            | Valores medios mundiales de 1948 a septiembre de 2017<br><br>Promedio mensual climatológico derivado de los datos de 1981 a 2010                                                                                                                                                               | Retícula mundial de 0,5 grados de latitud x 0,5 grados de longitud                                                                                                                                                     |
| Centro Mundial de Climatología de las Precipitaciones (GPCC) <sup>e</sup>                                                                                                          | Conjunto de datos sobre las precipitaciones mensuales basados en observaciones realizadas por estaciones                                                                                                                      | Desde 1901 hasta el presente<br><br>Valores mensuales: enero de 1901 a 2013, incluido (versión 7 completa)<br><br>Valores mensuales: enero de 2007 hasta prácticamente el presente (vigilancia)<br><br>Valores mensuales: enero de 2014 hasta prácticamente el presente ( <i>first guess</i> ) | Retícula mundial de 0,5 grados de latitud x 0,5 grados de longitud<br><br>Retícula mundial de 1,0 grados de latitud x 1,0 grados de longitud<br><br>Retícula mundial de 2,5 grados de latitud x 2,5 grados de longitud |
| Radiación saliente de onda larga (OLR) interpolada de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA) <sup>a</sup>                                                  | Datos reticulados diarios y mensuales sobre OLR                                                                                                                                                                               | Valores mensuales: junio de 1974 a diciembre de 2013<br><br>Valores diarios: junio de 1974 a 31 de diciembre de 2013<br><br>Promedio climatológico de valores mensuales y diarios: 1981 a 2010                                                                                                 | Retícula mundial de 0,5 grados de latitud x 2,5 grados de longitud                                                                                                                                                     |
| Kaplan Extended SST V2 (Temperatura superficial del mar extendida, Kaplan, versión 2) <sup>a</sup>                                                                                 | Datos reticulados sobre anomalías de la temperatura superficial del mar a escala mundial desde 1856 a la actualidad, obtenidos de los datos sobre temperatura superficial del mar de la Oficina Meteorológica del Reino Unido | Enero de 1856 a septiembre de 2017                                                                                                                                                                                                                                                             | Retícula mundial de 5,0 grados de latitud x 5,0 grados de longitud                                                                                                                                                     |

| <i>Conjunto mundial de datos</i>                                                                                                      | <i>Variables</i>                                                                                                                                                                                                                                     | <i>Cobertura temporal</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <i>Cobertura espacial</i>                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| NOAA Extended Reconstructed SST V3b (temperatura superficial del mar reconstruida extendida, versión 3b, de la NOAA) <sup>a</sup>     | Análisis mensual de la temperatura superficial del mar a escala mundial de 1854 a la actualidad. Datos derivados del conjunto internacional integrado de datos oceánicos y atmosféricos. La falta de datos se suple utilizando métodos estadísticos. | Valores mensuales: enero de 1854 hasta el presente<br><br>Promedio mensual climatológico derivado de los datos del período de 1971 a 2000<br><br>Promedio mensual climatológico derivado de los datos del período de 1981 a 2010                                                                                        | Retícula mundial de 2,0 grados de latitud x 2,0 grados de longitud |
| NOAA Extended Reconstructed SST V5 (temperatura superficial del mar reconstruida extendida, versión 5, de la NOAA) <sup>a</sup>       | Análisis mensual de la temperatura superficial del mar a escala mundial de 1854 al presente. Datos derivados del conjunto internacional integrado de datos oceánicos y atmosféricos. La falta de datos se suple utilizando métodos estadísticos.     | Valores mensuales: enero de 1854 al presente<br><br>Promedio mensual climatológico derivado de los datos del período de 1981 a 2010                                                                                                                                                                                     | Retícula mundial de 2,0 grados de latitud x 2,0 grados de longitud |
| Análisis unificado mundial de las precipitaciones diarias basado en datos de pluviómetros del CPC <sup>a</sup>                        | Análisis unificado mundial diario de las precipitaciones basado en pluviómetros                                                                                                                                                                      | Valores diarios: 1 de enero de 1979 al presente<br><br>Promedio mensual climatológico de los valores mensuales y diarios para el período de 1981 a 2010                                                                                                                                                                 | Retícula de 0,50 grados de latitud x 0,50 grados de longitud       |
| Temperatura diaria mundial del CPC <sup>a</sup>                                                                                       | Temperatura terrestre diaria a escala mundial                                                                                                                                                                                                        | Valores diarios: 1 de enero de 1979 al presente<br><br>Promedio mensual climatológico de los valores mensuales y diarios para el período de 1981 a 2010                                                                                                                                                                 | Retícula de 0,50 grados de latitud x 0,50 grados de longitud       |
| NOAA Optimum Interpolation (OI) SST V2 (Temperatura superficial del mar con interpolación óptima, versión 2, de la NOAA) <sup>a</sup> | Temperatura superficial del mar                                                                                                                                                                                                                      | Promedio semanal: 29 de octubre de 1981 a 28 de diciembre de 1989<br><br>Promedio mensual: diciembre de 1981 a septiembre de 2017<br><br>Promedio mensual climatológico derivado de los datos para el período de 1961 a 1990<br><br>Promedio mensual climatológico derivado de los datos para el período de 1971 a 2000 | Retícula mundial de 1,0 grados de latitud x 1,0 grados de longitud |

| <i>Conjunto mundial de datos</i>                                                                                                                                                   | <i>Variables</i>                                       | <i>Cobertura temporal</i>                                                                                                                                                                         | <i>Cobertura espacial</i>                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| NOAA OLR–Daily CDR (Radiación saliente de onda larga – Registro de datos climáticos diarios de la NOAA): versión interpolada de la División de Ciencias Físicas (PSD) <sup>a</sup> | Datos reticulados diarios sobre OLR a 1x1 interpolados | Valores diarios: 1 de enero de 1979 a 12 de enero de 2012<br><br>Valores mensuales: 1 de enero de 1979 a 12 de enero de 2012<br><br>Promedio mensual climatológico para el período de 1981 a 2010 | Retícula mundial de 1,0 grados de latitud x 1,0 grados de longitud |

| <i>Conjunto de datos regional</i>                                                                                                                                               | <i>Variables</i>                                                                       | <i>Cobertura temporal</i>                                                                                                     | <i>Cobertura espacial</i>                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Datos reticulados sobre anomalías de la temperatura y las precipitaciones del Canadá (CANGRD) <sup>f</sup>                                                                      | Datos reticulados sobre anomalías de la temperatura y las precipitaciones              | Anomalías de la temperatura y las precipitaciones anuales, estacionales y mensuales: 1901 a 2003                              | Resolución de 10 km                                                                                                                     |
| Datos de precipitaciones por hora en los Estados Unidos <sup>a</sup>                                                                                                            | Precipitaciones                                                                        | Valores horarios: enero de 1948 a septiembre de 2002                                                                          | Retícula de los Estados Unidos de 2,0 grados de latitud x 2,5 grados de longitud (33x21)<br><br>20N–60.0N, 220.0E–297.5E                |
| Conjunto de datos reticulados E (Europe)-OBS V16 <sup>g</sup>                                                                                                                   | Temperatura media, mínima y máxima, suma de la precipitación y media del nivel del mar | Valores diarios: 1 de enero de 1950 a 31 de agosto 2017                                                                       | Dispuestos en retícula latitudinal/longitudinal regular de 0,25 x 0,5 grados, así como en retícula de polo rotado de 0,22 x 0,44 grados |
| Climatología de la lluvia en África ARC2 <sup>h</sup>                                                                                                                           | Lluvia                                                                                 | Valores diarios: desde el 1 de enero de 1960 (12:00:00) ordenados desde el 1 de enero de 1983 hasta el 1 de noviembre de 2018 | De los 20O a 55E, con una resolución de 0,1 grados                                                                                      |
| Datos reticulados sobre precipitaciones en América del Sur de la PSD <sup>a</sup>                                                                                               | Precipitaciones                                                                        | Valores diarios: enero de 1940 a abril de 2012, incluido                                                                      | Solo zonas terrestres 60°S–15°N 85°O–30°O Retículas de 1,0 x 2,5 grados                                                                 |
| Datos reticulados sobre variabilidad de la lluvia en Australia <sup>i</sup>                                                                                                     | Lluvia                                                                                 | Valores trimestrales y anuales de lluvia, índices de variabilidad                                                             | Retículas de 0,25°/25 km                                                                                                                |
| Precipitaciones en Asia – Integración de datos de observación de alta resolución para la evaluación de los recursos hídricos (APHRODITE) (APHRO_MA/ME/RU_V 1101R1) <sup>j</sup> | Precipitaciones                                                                        | Valores diarios: 1951 a 2007                                                                                                  | Varía en función del producto                                                                                                           |

<sup>a</sup> División de Ciencias Físicas (PSD) del Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA)

<sup>b</sup> Unidad de Investigación Climática (CRU), Universidad de East Anglia

<sup>c</sup> Red mundial de datos climatológicos históricos (GHEN), Centros Nacionales de Información Ambiental, NOAA

- <sup>d</sup> Sistema de Vigilancia de las Anomalías del Clima (CAMS)  
<sup>e</sup> Servicio Meteorológico de Alemania  
<sup>f</sup> Departamento de Medio Ambiente y Cambio Climático del Canadá  
<sup>g</sup> Proyecto de evaluación del clima europeo y de series de datos (ECA&D)  
<sup>h</sup> Centro de Predicción Climática de la NOAA  
<sup>i</sup> Oficina de Meteorología de Australia  
<sup>j</sup> Instituto de Investigación sobre la Humanidad y la Naturaleza e Instituto de Investigaciones Meteorológicas del Servicio Meteorológico del Japón

### 6.2.2 Conjuntos de datos reticulados basados en modelos climáticos

Existen múltiples modelos climáticos tanto numéricos como estadísticos del clima pasado, presente y futuro en una variedad de escalas geográficas y temporales. Todos ellos producen resultados en forma de datos reticulados. Aunque los datos de los modelos son una representación numérica o estadística de las condiciones climáticas reales, una de las ventajas de la modelización del clima es la amplia gama de variables climáticas que pueden obtenerse de ella. Estas van mucho más allá de las observadas con los instrumentos tradicionales, y se presentan en forma de conjuntos de datos reticulados. En la tabla 6.2 figuran algunos ejemplos de conjuntos de datos reticulados basados en modelos climáticos.

**Tabla 6.2. Ejemplos de conjuntos de datos reticulados mundiales y regionales basados en modelos climáticos**

| <i>Conjunto de datos</i>                                                                                | <i>Variables</i>                                                                                        | <i>Cobertura temporal</i>                                                                                                              | <i>Cobertura espacial</i>                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) <sup>a</sup>                       | Conjunto amplio de variables de superficie y de altitud procedentes de 62 modelos climáticos            | Simulaciones climáticas diarias, mensuales, a largo plazo (siglos) y a corto plazo (de 10 a 30 años)                                   | Mundial, los tamaños de las retículas van de 1,5 a 3,5 grados |
| Experimento coordinado sobre reducción de escala de modelos climáticos regionales (CORDEX) <sup>b</sup> | Conjunto amplio de variables de superficie y de altitud procedentes de 54 modelos climáticos regionales | Simulaciones climáticas cada tres horas, cada seis horas, diarias, mensuales, a largo plazo (siglos) y a corto plazo (de 10 a 30 años) | 14 regiones, tamaño de la retícula: 50 km/0,5 grados          |

<sup>a</sup> Programa sobre diagnosis y comparación de modelos climáticos, Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, Livermore, California (Estados Unidos).

<sup>b</sup> Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología, Norrköping.

### 6.2.3 Datos retrospectivos

Un retroanálisis es una predicción de un suceso pasado en la que únicamente se introducen observaciones anteriores al fenómeno en el sistema utilizado para hacer la predicción (IPCC, 2013; OMM METEOTERM). En algunas ocasiones, a los retroanálisis se les denomina repredicciones, que son conjuntos de datos normalizados que se utilizan para mejorar las predicciones meteorológicas (Hamill y otros, 2006). Se trata de predicciones meteorológicas retrospectivas generadas con la misma versión del modelo de predicción numérica del tiempo utilizado en las predicciones meteorológicas en tiempo real que se están evaluando. Es posible utilizar una secuencia de análisis retrospectivos para calibrar el sistema de predicción o estimar el nivel medio de capacidad demostrado por este en el pasado, lo que sirve de orientación acerca del rendimiento que cabe esperar de él en el futuro.

La calidad de una predicción se mide comparando el acierto de la predicción con la información basada en la observación. Las predicciones de sucesos pasados, es decir, los retroanálisis o predicciones retrospectivas, pueden someterse a análisis para obtener indicaciones sobre la calidad que cabe esperar de las predicciones futuras para una variable concreta en una ubicación concreta. A continuación, se señalan algunos ejemplos de la importancia de los retroanálisis o las predicciones retrospectivas como instrumento para mejorar el conocimiento de los mecanismos físicos que desencadenan determinados procesos o la detección de sesgos sistemáticos en los experimentos de modelización.

Como ejemplo de aplicación de la técnica, Katragkou y otros (2015) presentan seis simulaciones retrospectivas del modelo de investigación y predicciones meteorológicas (WRF) en el marco del Experimento coordinado sobre reducción de escala de modelos climáticos regionales para Europa (EURO-CORDEX) con diferentes configuraciones en lo que respecta a la microfísica, la convección y la radiación para el período abarcado entre 1990 y 2008. El objetivo es identificar sesgos sistemáticos y zonas de grandes incertidumbres en el clima europeo actual, y relacionarlas con procesos físicos concretos (por ejemplo, las interacciones nubes-radiación y tierra-atmósfera).

Otro estudio realizado por Dake y otros (2004) presenta una predicción retrospectiva de las fluctuaciones climáticas interanuales en el Pacífico tropical para el período de 1857 a 2003 utilizando un modelo de acoplamiento océano-atmósfera. El modelo predice con acierto todos los episodios importantes de El Niño en dicho período con una antelación de hasta dos años. Estos resultados demuestran que es la dinámica interna autónoma, y no el forzamiento estocástico, la que controla la evolución del fenómeno.

En lo que respecta a la aplicación de esta técnica, los estudios retrospectivos de la energía de las olas en zonas costeras concretas durante períodos más breves ayudan a determinar la variabilidad y las tendencias en las diferentes zonas, lo que permite la caracterización del clima de oleaje, que es un instrumento fundamental para la evaluación de la energía undimotriz.

#### 6.1.4. **Reanálisis**

En el análisis y la predicción numéricos del tiempo con fines operativos, el término "análisis" se refiere al proceso de crear una representación reticular del medio ambiente en cuatro dimensiones con coherencia interna. Dado que el tiempo es un factor crucial para la predicción meteorológica, el análisis de inicialización normalmente debe comenzar antes de que las observaciones estén disponibles. Para el reanálisis se utiliza el mismo proceso (y, a menudo, los mismos sistemas), pero, como se efectúa semanas o incluso años más tarde, puede emplearse un conjunto de observaciones más completo. Por lo general, estos sistemas de reanálisis incorporan un modelo de predicción que facilita información sobre los cambios que va experimentando el medio ambiente con el transcurso del tiempo, sin perder la coherencia interna. A diferencia del "análisis" de la predicción meteorológica con fines operativos, en el que los modelos se actualizan constantemente para incorporar los adelantos más recientes en materia de investigación, el "reanálisis" emplea un sistema de modelización fijo durante todo el período de su duración para evitar la falta de homogeneidad que generalmente afecta a los conjuntos de datos con fines operativos debido a los diferentes modelos utilizados a lo largo del tiempo.

El resultado de un reanálisis se presenta en una retícula uniforme en la que no falta ningún dato. Es importante señalar que los valores del reanálisis no son datos "reales", sino más bien estimaciones de datos reales a partir de datos de observaciones distribuidas de manera desigual. Constituye un registro histórico integrado del estado del medio atmosférico para cuya obtención todos los datos se han procesado de la misma manera. A menudo, se utilizan los resultados de los reanálisis en lugar de datos de observación, pero debe prestarse especial atención al hacerlo. Aunque los algoritmos de análisis aprovechen las observaciones cuando estas estén disponibles, en las regiones en las que las observaciones escaseen, el reanálisis reticular se verá muy influenciado por el modelo de predicción. Por lo general, en el caso de los proyectos de reanálisis que se extienden durante decenios, se observa mucha heterogeneidad en el tipo y la cobertura de los datos a lo largo de ese período, como entre los períodos pre- y postsatelitales. Además, la influencia relativa de las observaciones y el modelo difiere en función de las diferentes variables climáticas; ciertas variables se ven muy influenciadas por los datos de observación utilizados, mientras que otras se derivan exclusivamente de modelos. Estos aspectos deberían considerarse detenidamente al interpretar el reanálisis de los productos de datos. Por ejemplo, los reanálisis de las variables dinámicas resultan mucho mejores que los reanálisis de la precipitación, en parte debido a que los procesos que conducen a la precipitación no se representan adecuadamente en los modelos.

Las limitaciones de los resultados de los reanálisis se evidencian más en las zonas cuya orografía es compleja (en particular, las regiones montañosas), así como en otras zonas donde

los esquemas de asimilación y proceso no pueden reproducir, a causa del suavizamiento, procesos atmosféricos reales con elevados gradientes espaciales y temporales. Además, sigue planteándose el problema de la localización a escalas temporales y espaciales más finas que la retícula de reanálisis. Se está trabajando para poder efectuar "reanálisis regionales" utilizando más datos de observación locales con modelos de área limitada de mayor resolución. Al igual que con cualquiera de las técnicas de análisis, la validación de los modelos, el aseguramiento de la calidad y los indicadores de errores son necesarios para interpretar correctamente los resultados.

La información procedente no solo de las ciencias atmosféricas, sino también de la oceanografía, la hidrología y la teledetección se utiliza para crear bases de datos medioambientales que permiten evaluar mejor los cambios sistemáticos. Actualmente, las principales bases de datos de reanálisis a escala mundial son las del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas y los Centros Nacionales de Predicción del Medio Ambiente de los Estados Unidos de América, el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo y el Servicio Meteorológico del Japón (tabla 6.3). Toda esta labor de reanálisis resulta muy útil para la vigilancia del clima, los estudios de la variabilidad del clima y la predicción del cambio climático. Es importante evaluar la capacidad relativa de las técnicas de reanálisis para representar las características observadas en una determinada región antes de utilizar sus datos en estudios climatológicos ulteriores. Las bases de datos de reanálisis podrían mejorarse con un mayor conocimiento de los procesos físicos, químicos y biológicos que controlan el medio ambiente, así como con datos obtenidos de una serie de fuentes que van mucho más allá las ciencias atmosféricas. A medida que los modelos numéricos se vayan perfeccionando y que la tecnología informática permita una resolución más alta, se irán obteniendo productos de reanálisis más exactos y exhaustivos.

**Tabla 6.3. Sistemas de reanálisis mundiales y regionales**

| <i>Sistema de reanálisis</i>       | <i>Origen</i>                                                                   | <i>Período</i>                      | <i>Sitio web</i>                                                                                                                                          |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ASR <sup>a</sup>                   | Universidad Estatal de Ohio                                                     | 2000 a 2012                         | <a href="http://rda.ucar.edu/datasets/ds631.4/">http://rda.ucar.edu/datasets/ds631.4/</a>                                                                 |
| CFSR <sup>b</sup>                  | NOAA/NCEP (CDAS-T382) <sup>c</sup>                                              | Enero de 1979 a diciembre de 2010   | <a href="http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr">http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr</a>                                                                                 |
| CFSv2                              | NOAA/NCEP (CDAS-T574)                                                           | Enero de 2011 hasta el presente     | <a href="http://cfs.ncep.noaa.gov/">http://cfs.ncep.noaa.gov/</a>                                                                                         |
| COSMO Regional Reanalysis (Europa) | Hans-Ertel-Centre, Servicio Meteorológico de Alemania (DWD) Universidad de Bonn | 1995 hasta el presente              | <a href="http://reanalysis.meteo.uni-bonn.de/?Overview">http://reanalysis.meteo.uni-bonn.de/?Overview</a>                                                 |
| ERA-20Ca                           | ECMWF <sup>d</sup>                                                              | Enero de 1900 a diciembre de 2010   | <a href="http://apps.ecmwf.int/datasets/">http://apps.ecmwf.int/datasets/</a>                                                                             |
| ERA-40                             | ECMWF                                                                           | Septiembre de 1957 a agosto de 2002 | <a href="http://apps.ecmwf.int/datasets/">http://apps.ecmwf.int/datasets/</a>                                                                             |
| ERA-Interim                        | ECMWF                                                                           | Enero de 1979 hasta el presente     | <a href="http://apps.ecmwf.int/datasets/">http://apps.ecmwf.int/datasets/</a>                                                                             |
| JRA-25/JCDAS <sup>e</sup>          | JMA <sup>f</sup> y CRIEPI <sup>g</sup> (JRA-25)                                 | Enero de 1979 a enero de 2014       | <a href="http://jra.kishou.go.jp/JRA-25/index_en.html">http://jra.kishou.go.jp/JRA-25/index_en.html</a>                                                   |
| JRA-55b <sup>h</sup>               | JMA                                                                             | Enero de 1958 hasta el presente     | <a href="http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html">http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html</a>                                                   |
| MERRA <sup>i</sup>                 | NASA GMAO <sup>j</sup>                                                          | Enero 1979 a febrero de 2016        | <a href="https://gmao.gsfc.nasa.gov/merra/">https://gmao.gsfc.nasa.gov/merra/</a>                                                                         |
| MERRA-2c                           | NASA GMAO                                                                       | Enero de 1980 hasta el presente     | <a href="https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/">https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/</a>                                                       |
| NCEP-DOE <sup>k</sup> R2           | NOAA/NCEP y proyecto DOE AMIP <sup>l</sup> -II (R2)                             | Enero de 1979 hasta el presente     | <a href="https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html">https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html</a> |



| <i>Sistema de reanálisis</i>      | <i>Origen</i>                                    | <i>Período</i>                        | <i>Sitio web</i>                                                                                                                                        |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NCEP-NCAR <sup>m</sup> R1,        | NOAA/NCEP y NCAR(R1)                             | Enero de 1948 hasta el presente       | <a href="https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html">https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html</a> |
| NCEP NARR <sup>n</sup>            | NCEP                                             | 1979 hasta prácticamente el presente  | <a href="http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rrean/">http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rrean/</a>                                                           |
| NOAA-CIRES <sup>o</sup> 20CR v2d, | NOAA y CIRES(20CR) de la Universidad de Colorado | Noviembre de 1869 a diciembre de 2012 | <a href="https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.20thC_ReanV2c.html">https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.20thC_ReanV2c.html</a>     |

- <sup>a</sup> Reanálisis del Sistema Ártico (ASR)  
<sup>b</sup> Reanálisis del Sistema de Predicción Climática (CFSR)  
<sup>c</sup> Sistema de Asimilación de Datos Climáticos (CDAS) del Centro Nacional para la Predicción del Medio Ambiente (NCEP) de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA)  
<sup>d</sup> Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (CEPMMP)  
<sup>e</sup> Proyecto de reanálisis de 25 años del Japón (JRA-25)/Sistema de Asimilación de Datos Climáticos (JCDAS) del Servicio Meteorológico del Japón (JMA)  
<sup>f</sup> Servicio Meteorológico del Japón (JMA)  
<sup>g</sup> Instituto Central de Investigaciones de la Industria Eléctrica (CRIEPI)  
<sup>h</sup> Reanálisis de 55 años del Japón (JRA-55)  
<sup>i</sup> Análisis retrospectivo de la era moderna para la investigación y sus aplicaciones (MERRA)  
<sup>j</sup> Oficina de Modelización y Asimilación Global (GMAO) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA)  
<sup>k</sup> Departamento de Energía (DOE)  
<sup>l</sup> Proyecto de Intercomparación de Modelos Atmosféricos (AMIP)  
<sup>m</sup> Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR)  
<sup>n</sup> Reanálisis Regional de América del Norte (NARR)  
<sup>o</sup> Instituto Cooperativo de Investigación en Ciencias Ambientales (CIRES), Universidad de Colorado

### 6.3 MODELOS CLIMÁTICOS Y EVOLUCIÓN PROBABLE DEL CLIMA

El sistema climático, su comportamiento, sus componentes e interacciones y su posible evolución y cambios futuros pueden representarse y examinarse utilizando modelos climáticos. En particular, nuestros conocimientos acerca del sistema climático son cada vez más abundantes y disponemos de computadoras más grandes y rápidas, de modo que se están elaborando modelos climáticos progresivamente más complejos y con una resolución mayor. Los modelos pueden utilizarse para una serie de aplicaciones, como predicciones y proyecciones climáticas, una vez que sus representaciones de ciertos elementos y procesos del sistema climático se han analizado y se han mostrado precisas.

Las predicciones de la evolución probable del clima, que aportan los valores medios o acumulados previstos para un elemento climático, por lo general para un período de entre un mes y varios años, derivan del análisis y la interpretación de las observaciones y de los resultados de los modelos climáticos.

Entre los modelos más simples se encuentran los que se basan en relaciones empíricas o estadísticas establecidas entre variables a gran escala (por ejemplo, la temperatura de la superficie del mar, vientos) y variables meteorológicas en superficie (por ejemplo, la lluvia, la temperatura o la velocidad del viento). Los modelos más complejos, como los modelos climáticos globales (MCG, véase la sección 6.3.4), hacen un análisis y un acoplamiento del sistema climático de todo el mundo y se emplean para elaborar modelos del clima futuro de manera explícita o sobre la base de ciertos supuestos. Los modelos climáticos regionales se concentran en representar el clima a escalas espaciales menores en una zona limitada. Al uso de modelos climáticos globales o regionales se le conoce como enfoque dinámico. En algunos casos, se emplea un enfoque híbrido (que combina los métodos estadístico y dinámico). Este método se basa en las relaciones entre los resultados de los MCG y los datos históricos. Como las predicciones numéricas a partir de MCG requieren muchos recursos informáticos, solo un número reducido de centros climáticos pueden efectuar predicciones climáticas numéricas con fines operativos. En general, todos estos modelos se utilizan ampliamente para la elaboración de predicciones de la evolución probable del clima.

### 6.3.1 Productos sobre la evolución probable del clima

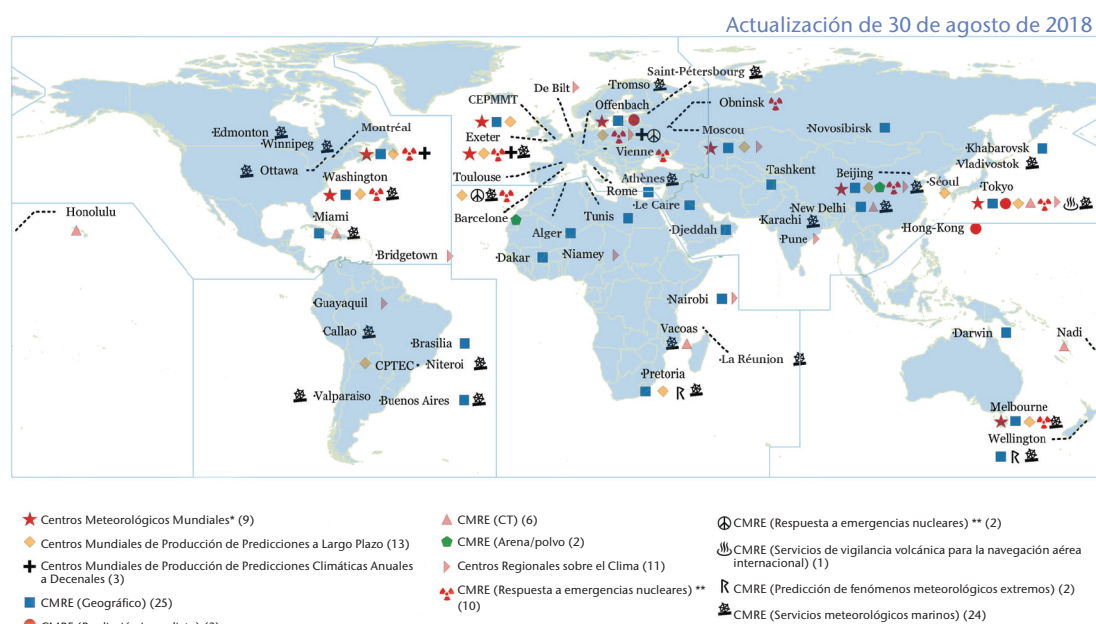
Las predicciones de la evolución probable del clima son predicciones de los valores medios o acumulados de los elementos climáticos en escalas temporales de entre un mes y varios años. Las predicciones estacionales se utilizan con más frecuencia y en general pueden emitirse mensualmente. En otros casos, las predicciones se realizan únicamente para estaciones concretas o a otros intervalos predefinidos. Los elementos climáticos que se predicen normalmente son la temperatura media del aire en superficie y la precipitación total. En algunos centros se predicen cada vez más otros parámetros como el número de días con precipitación, las nevadas, la frecuencia de los ciclones tropicales y el comienzo y el fin de las estaciones monzónicas.

Las predicciones relativas a la temperatura de la superficie del mar en los trópicos también pueden considerarse productos de predicción del clima, dada la importancia del forzamiento de la temperatura de la superficie del mar en las regiones tropicales. En particular, las predicciones del ENOS tienen una gran demanda y son difundidas principalmente por la mayoría de los Centros Mundiales de Producción de Predicciones a Largo Plazo y otras instituciones internacionales. En última instancia, el elemento de predicción, la frecuencia y el tiempo de antelación pueden variar en función de las características del clima de un país o de una región en concreto y, lo que es más importante, deben estar relacionados con las necesidades de los usuarios.

La Organización Meteorológica Mundial colabora con sus Miembros para elaborar proyecciones estacionales a escala mundial como el boletín “El Niño/La Niña hoy” y el Boletín sobre el clima estacional mundial. “El Niño/La Niña hoy” es una publicación basada en el consenso en la que se utiliza la información procedente de una red mundial de centros de predicción y en la que se ofrecen indicaciones sobre la fase e intensidad del fenómeno ENOS. En el Boletín sobre el clima estacional mundial se resume el estado actual y el comportamiento futuro esperado del clima estacional abordando las principales características de circulación generales y las anomalías oceánicas mundiales a gran escala, así como sus posibles consecuencias en las pautas de temperatura y de precipitación a escala continental. El Boletín sobre el clima estacional mundial es el fruto de la colaboración entre el Centro principal de predicción a largo plazo mediante conjuntos multimodelos de la OMM, los Centros Mundiales de Producción de Predicciones a Largo Plazo y la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA), entre otros. Ambos boletines deben considerarse complementarios a las proyecciones climáticas estacionales regionales y nacionales más detalladas, como las elaboradas por los foros regionales sobre la evolución probable del clima y los SMHN.

La elaboración de predicciones climáticas con fines operativos está a cargo de los SMHN, los Centros Regionales sobre el Clima, los Centros Mundiales de Producción de Predicciones a Largo Plazo y otras instituciones internacionales. Idealmente, estas instituciones deberían elaborar sus proyecciones de acuerdo con el *Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción* (OMM-Nº 485). El Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción abarca Centros Meteorológicos Mundiales, Centros Meteorológicos Regionales Especializados y SMHN, que realizan funciones a nivel mundial, regional y nacional (véase la figura 6.1). El Sistema representa las interacciones que cabe esperar al suministrar una predicción: los productos sobre la evolución probable del clima de los modelos climáticos globales se reducen a la escala regional y, posteriormente, a la escala nacional. Varios SMHN realizan predicciones para sus propios países basándose en los productos de los Centros Mundiales de Producción de Predicciones a Largo Plazo, los Centros Regionales sobre el Clima y otras instituciones internacionales.

Los productos de predicción pueden suministrarse directamente a usuarios concretos y, a menudo, es necesario que los servicios climáticos interpreten el significado de las predicciones y se lo den a conocer a los usuarios (véase el capítulo 7). Paralelamente, en los foros regionales sobre la evolución probable del clima (FREPC) se elaboran conjuntamente predicciones sobre la evolución probable del clima que se adoptan por consenso sirviéndose de las aportaciones (predicciones climáticas) de expertos sobre el clima nacionales, regionales e internacionales. Al reunir a países con características climatológicas similares, los foros garantizan la coherencia en el acceso a la información climática y en la interpretación de dicha información.



**Figura 6.1. Centros del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción de la OMM**

Además, mediante la interacción con los usuarios de los sectores económicos clave de cada región, los organismos de divulgación y los responsables de políticas, los foros valoran las posibles consecuencias de las proyecciones para los sectores socioeconómicos más pertinentes de una región concreta y estudian la forma en que estos podrían hacer uso de las proyecciones. Las predicciones también se suelen comunicar al público a través de los medios informativos y de Internet.

El Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC) desarrolla varios proyectos destinados a promover las proyecciones climáticas en diversas escalas temporales. Por ejemplo, el Proyecto de predicción subestacional a estacional, puesto en marcha en 2013, estudia fuentes de predictibilidad en la escala de tiempo subestacional a estacional. El Proyecto de Predicción Climática Decenal, que utiliza modelos climáticos globales para estudiar predicciones multianuales y decenales, se ha incluido en el diseño experimental del Proyecto de comparación de modelos acoplados. Uno de sus componentes es la producción, el análisis y la difusión constantes de predicciones experimentales multimodelo en tiempo casi real que sirvan como base para posibles productos de predicción operativa. Estas actividades contribuyen al Gran Desafío del PMIC en relación con la predicción climática a corto plazo, que tiene por objetivo subsanar la importante laguna en el suministro de información sin discontinuidad que existe entre las predicciones climáticas estacionales a interanuales, de un lado, y las proyecciones multidecenales y a más largo plazo relativas al cambio climático, del otro. Con esta iniciativa se trata de facilitar un servicio climático sin discontinuidad, tal y como recomienda el Marco Mundial para los Servicios Climáticos (MMSC).

La incertidumbre es inevitable en la predicción del clima debido a la naturaleza caótica de la atmósfera, los desafíos que plantean los datos de observación (por ejemplo, la calidad, la extensión, la densidad de la red, el acceso a los metadatos y la insuficiente cantidad de muestras de fenómenos extremos) y las aproximaciones de los modelos de predicción. Las incertidumbres también pueden estar relacionadas con la antelación de la predicción, la variable de interés y las escalas temporal y espacial. En este contexto, las predicciones determinísticas no suelen ser fiables. Sin embargo, las predicciones con estimaciones de la incertidumbre, como las predicciones probabilísticas, resultan esenciales. Los elementos de pronóstico suelen

representarse mediante categorías que los sitúan por encima de lo normal, cerca de lo normal y por debajo de lo normal. La predicción probabilística indica la probabilidad de ocurrencia de una categoría. Al señalar la categoría más probable, se genera otro tipo de representación. Ahora bien, las predicciones probabilísticas son más difíciles de aplicar. Es necesario que los usuarios conozcan las ventajas y las limitaciones de las predicciones probabilísticas y también los métodos de análisis de la relación costo-beneficio. Cuando las predicciones de los elementos se presentan como cantidades numéricas, la incertidumbre de las predicciones puede expresarse mediante límites de confianza o añadiendo estadísticas de verificación de las predicciones pasadas. El servicio climático debería, además, examinar los resultados de los experimentos de verificación de las predicciones precedentes para que sirvan de orientación en el uso de las predicciones probabilísticas.

### 6.3.2 Predicciones y proyecciones climáticas

En general, una predicción es el resultado de un modelo que calcula la evolución de parámetros específicos desde las condiciones iniciales hasta el estado final en escalas de tiempo estacionales, anuales o decenales. En una predicción se presupone que los factores que van más allá de los incluidos explícita o implícitamente en el modelo no tendrán una influencia significativa en lo que vaya a suceder. En este sentido, lo que más influye en una predicción son las condiciones reinantes captadas por las observaciones (condiciones iniciales) y los supuestos sobre los procesos físicos que determinarán los cambios en el futuro. Por ejemplo, una predicción que advierta de la llegada de un episodio de ENOS importante en los meses siguientes se verá influida principalmente por el estado del sistema climático que se está observando y por sus condiciones en el pasado reciente. Los pequeños cambios que puedan producirse a los pocos meses y otros factores que tengan una posible influencia en escalas temporales más largas, como las actividades humanas (condiciones de contorno), probablemente tengan menor importancia para la predicción climática.

Para la formulación de las predicciones puede optarse por un enfoque determinístico o probabilístico. Las predicciones determinísticas presentan un único valor vinculado a un período concreto. Las predicciones probabilísticas aportan un intervalo de posibles valores para un período concreto. Una predicción se vuelve probabilística cuando da cuenta de diversos tipos de incertidumbre. Una predicción probabilística se elabora con varias predicciones individuales obtenidas a partir un modelo climático con condiciones iniciales ligeramente diferentes (tanto atmosféricas como oceánicas), mediante el que se generan un conjunto de predicciones. Idealmente, el muestreo de las incertidumbres del modelo también se evalúa utilizando varios modelos (conjuntos multimodelo). La publicación *Directrices sobre los sistemas de predicción por conjuntos y la predicción* (OMM-Nº 1091) aporta orientaciones útiles en relación con este enfoque. Una predicción climática es una declaración de la probabilidad de que ocurra un fenómeno, con independencia de la intervención humana. Esto resulta importante para las instancias decisorias, puesto que sus acciones no tendrían efecto en los fenómenos meteorológicos o climáticos.

Una proyección climática suele ser una declaración de la probabilidad de que ocurra un fenómeno al cabo varios decenios o siglos, si se dan ciertas condiciones que influyen en ello. A diferencia de la predicción, una proyección tiene en cuenta cambios importantes en el conjunto de las condiciones de contorno, como un aumento de los gases de efecto invernadero, que podrían influir en el clima futuro. Como consecuencia, surgen expectativas condicionales (si ocurre esto, cabe esperar eso). Para las proyecciones relativas a un futuro lejano, se prevén escenarios (véase la sección 6.3.3) de lo que podría ocurrir atendiendo a diversos supuestos y opiniones.

Como en el caso de las predicciones climáticas, la incertidumbre inherente a las proyecciones debería evaluarse utilizando los diferentes escenarios posibles y diversos modelos para muestrear también las incertidumbres del modelo utilizado. Para las instancias decisorias, las proyecciones indican los resultados probables derivados, en parte, de la adopción de medidas concretas impulsadas por políticas.

### 6.3.3 Escenarios climáticos

Los modelos climáticos globales se usan principalmente para crear escenarios climáticos. Un escenario climático consiste en una representación plausible del clima futuro que se elabora para examinar las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico, pero que también debería indicar condiciones futuras que explican la variabilidad natural del clima. Los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (por ejemplo, IPCC, 2013) son una buena fuente de información sobre los escenarios climáticos futuros en una escala temporal que abarca desde varios decenios hasta un siglo. Por ejemplo, el *Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5)* incluía proyecciones basadas en una escala de posibles valores del forzamiento radiativo para el año 2100 respecto de la era preindustrial (+2,6, +4,5, +6,0 y +8,5 W/m<sup>2</sup>) (véase “Resumen para Responsables de Políticas”, en *Cambio climático 2013: Bases físicas*, sección E.7, tabla RRP.3). Estos escenarios se denominan trayectorias de concentración radiativa (respectivamente, RCP 2,6; 4,5; 6; y 8,5). Estas trayectorias se utilizan como datos de entrada para MCG cuyos resultados y análisis ulteriores describen cuatro posibles climas futuros; todos ellos se consideran posibles en función de la cantidad de gases de efecto invernadero que se emitan en los próximos años. Al evaluar la posible influencia de estas trayectorias en el clima mediante el uso de diferentes modelos climáticos, cada uno con su propia sensibilidad climática, las proyecciones del cambio climático dan cuenta de una amplia gama de posibilidades razonables tanto del desarrollo social como del comportamiento climático. Si bien el uso de estas trayectorias como dato de entrada para los modelos climáticos es el enfoque más reciente para la obtención de posibles climas futuros, entre los datos de entrada más utilizados anteriormente para ese fin están los escenarios descritos en el Informe especial sobre escenarios de emisiones del IPCC (IE-EE) (por ejemplo, A1B, B2).

### 6.3.4 Modelos climáticos globales

El principal objetivo de los modelos climáticos globales consiste en representar procesos climáticos a escala mundial. Dichos modelos proporcionan los medios indispensables para examinar la variabilidad del clima y el cambio climático en el pasado, presente y futuro. Se basan en los fundamentos físicos que rigen los procesos y las interacciones de todos los componentes del sistema climático, expresados en forma de ecuaciones matemáticas en tres dimensiones. Las ecuaciones rectoras altamente no lineales se resuelven numéricamente en una retícula cuatridimensional de la atmósfera (tres dimensiones espaciales más el tiempo). Muchos procesos físicos, como las nubes aisladas, la convección y la turbulencia, se desarrollan en escalas temporales y espaciales mucho más pequeñas que las que pueden resolverse adecuadamente en la retícula. Estos procesos han de incluirse mediante una representación simplificada llamada parametrización; se trata de un método utilizado para reemplazar procesos complejos a pequeña escala que están en el modelo a través de un proceso simplificado.

Estos modelos comenzaron a utilizarse en el decenio de 1960 y, desde entonces, se han desarrollado y perfeccionado rápidamente. Dichos modelos se desarrollaron en paralelo a los modelos de predicción numérica del tiempo. Inicialmente, los MCG estaban destinados a acoplar la atmósfera y el océano, pero, hoy en día, la mayoría de los MCG más modernos incluyen representaciones de la criosfera, la biosfera, la superficie terrestre y de la química y los aerosoles atmosféricos en modelos integrados cada vez más complejos que, a veces, se denominan modelos del sistema Tierra.

Los MCG se han vuelto mucho más fiables gracias a las comparaciones que se hacen sistemáticamente entre los modelos (por ejemplo, el Proyecto de comparación de modelos acoplados), la capacidad de ciertos modelos para reproducir las principales tendencias del clima del siglo XX y de algunos paleoclimas, y la mejor simulación de los principales rasgos de la circulación general relacionados con fenómenos tales como el ENOS. En general, en muchos lugares del mundo, los MCG facilitan simulaciones climáticas verosímiles a escalas subcontinentales y para escalas temporales que van desde las estacionales hasta las decenales y, por lo tanto, se consideran herramientas adecuadas para ofrecer predicciones y proyecciones útiles sobre el clima. Estos MCG han sentado las bases para las proyecciones climáticas de las



evaluaciones que efectúa el IPCC y contribuyen considerablemente a la predicción estacional operativa, especialmente a través de la comunidad de Centros Mundiales de Producción de Predicciones a Largo Plazo y los foros sobre la evaluación probable del clima.

Hay mucho interés en perfeccionar la resolución espacial de los MCG para poder simular el clima en escalas menores, en las que se observan la mayoría de las repercusiones y existe una capacidad de adaptación. Los climas en escalas más pequeñas están determinados por una interacción de forzamientos y circulaciones a escalas espaciales mundiales, regionales y locales y a escalas temporales que abarcan desde las subdiarias a las multidecenales. Los forzamientos regionales y locales son producto de una topografía compleja y de las modalidades del uso de la tierra, los rasgos de la interfaz tierra-océano, las circulaciones atmosféricas regionales y locales, tales como las brisas marinas y las tormentas tropicales, la distribución de partículas de aerosoles y de gases atmosféricos, y los efectos de los lagos, la nieve y los hielos marinos. El clima de una zona también puede verse muy influido por procesos de teleconexión por anomalías de forzamiento en lugares lejanos. Los procesos suelen ser altamente no lineales, lo que dificulta la proyección y la predicción a escala mundial. Como respuesta a estas dificultades de modelización, se han elaborado modelos climáticos regionales y modelos de reducción estadística de escala para obtener información climática con una resolución espacial más detallada. Los modelos climáticos regionales son modelos de alta resolución de área limitada encajados en un modelo global más aproximativo. La reducción estadística de escala implica la aplicación de relaciones estadísticas entre las escalas de mayor y menor tamaño que se han observado en el clima. Ambos enfoques pueden utilizarse para aportar información más pertinente en las escalas regional y local para su aplicación en el marco de las predicciones y proyecciones climáticas.

### 6.3.5 **Reducción de escala: modelos climáticos regionales**

Los modelos climáticos globales no pueden proporcionar información directa respecto de escalas inferiores a su propia resolución. Un proceso denominado reducción de escala permite aplicar las propiedades de un modelo de gran escala a climas regionales y locales de menor escala. Puede emplearse tanto un método dinámico como uno estadístico, o una combinación de ambos. No obstante, antes de reducir la escala, es importante evaluar la influencia de las características a gran escala en el clima de la región o el lugar de interés. De hecho, la reducción de escala solamente puede aportar información adicional si las condiciones a pequeña escala experimentan un forzamiento considerable por parte de las de mayor escala. Por ejemplo, la intensidad de los vientos alisios puede ejercer un forzamiento considerable en los efectos orográficos de una isla tropical.

El enfoque dinámico utiliza modelos climáticos regionales que suelen emplear información sinóptica y de mayor escala procedente de un MCG para simular un clima regional. Los modelos climáticos regionales pueden aportar datos con una resolución de hasta unos pocos kilómetros. Una de las principales dificultades que plantean estos modelos es la manera de transferir la información de una celda de retícula ancha procedente del MCG a través del contorno a las celdas de retícula más fina de los modelos climáticos regionales. Además, entre las dificultades específicas de la modelización está la parametrización de la convección y de las condiciones iniciales en las escalas pertinentes. Ante estas dificultades, es necesario realizar una validación cuidadosa de los MCG y los modelos climáticos regionales antes de tratar de utilizar los resultados de uno de esos modelos o de ambos. El modelo climático regional se basa esencialmente en un MCG, de modo que el buen rendimiento de este último tiene una importancia crucial para la modelización a más pequeña escala. El enfoque que se describe aquí suele utilizarse para los estudios y proyectos relacionados con el cambio climático (por ejemplo, los experimentos del CORDEX), más que para la predicción estacional operativa, puesto que para esta última se requieren grandes recursos informáticos y el acoplamiento de archivos del MCG en tiempo casi real. Para los estudios sobre el cambio climático, es particularmente importante evaluar la incertidumbre del modelo además de las incertidumbres del escenario. A ese respecto, se recomienda utilizar varios modelos climáticos regionales, preferiblemente acoplados con varios MCG (véase el diseño experimental del CORDEX).



La reducción estadística de escala conlleva el establecimiento de relaciones estadísticas entre las variables a gran escala y las variables regionales y locales. Los resultados a gran escala de los MCG se utilizan en el modelo estadístico para obtener climas futuros a escala local y regional. Las limitaciones más importantes de la reducción estadística de escala son la disponibilidad de observaciones históricas adecuadas (en las que se basan las relaciones estadísticas) y el supuesto de que las relaciones estadísticas son válidas para regiones climáticas futuras (lo que se conoce también como estacionariedad). Pueden utilizarse varios métodos, pero, en general, cuanto más complejo sea el método, menos sólidos serán los resultados. Se han puesto en marcha proyectos de intercomparación como el proyecto de reducción de escala dinámica regional y estadística para los fenómenos extremos en regiones europeas (STARDEX) y el proyecto CORDEX. Para fines operativos, suelen utilizarse métodos lineales. La validación de los modelos estadísticos es esencial. Es necesario poner cuidado al interpretar la capacidad del modelo, representada mediante los índices de acierto.

Los métodos híbridos utilizan la información suministrada por un MCG o un modelo climático regional en un modelo estadístico para adaptar la salida del modelo a las características del clima regional o local. Se utilizan bastante en la predicción estacional, ya que permiten corregir algunos sesgos (especialmente el sesgo espacial) introducidos en la parte de modelización, y, por lo tanto, pueden contribuir de manera clara a mejorar la calidad de las predicciones. Para calibrar estos modelos, resulta crucial recurrir a predicciones retrospectivas del MCG (para las estadísticas de salida del modelo) o a un conjunto de reanálisis (para el método de la predicción perfecta). A diferencia de lo que sucede en los métodos estadísticos, se espera que las interacciones en el marco del sistema climático aparezcan representadas mediante la información a gran escala aportada por el MCG. Obviamente, lo dicho acerca de los métodos estadísticos también es pertinente para el componente estadístico de los métodos híbridos.

Todos estos métodos son susceptibles de incertidumbres causadas por la falta de conocimientos sobre el sistema terrestre, las aproximaciones en los parámetros y las estructuras de los modelos, la aleatoriedad y las actividades humanas. Es necesario evaluar la incertidumbre adicional introducida en el proceso de reducción de escala, si bien resulta bastante difícil validar y verificar los resultados de un modelo a escala reducida, especialmente si no se dispone de suficientes observaciones. A ese respecto, el uso de técnicas de espacialización (véase la sección 5.9.3) puede contribuir a interpolar las observaciones en tierra con la resolución espacial adecuada y a aportar un conjunto pertinente de datos de referencia para los fines de validación y verificación.

#### 6.4 EJEMPLOS DE PRODUCTOS Y PRESENTACIÓN DE DATOS

Los datos pueden presentarse de diversas maneras. Las figuras 6.2 a 6.13, así como el resto de figuras que se incluyen en esta Guía, muestran algunas de las muchas maneras simples pero eficaces de presentar información.

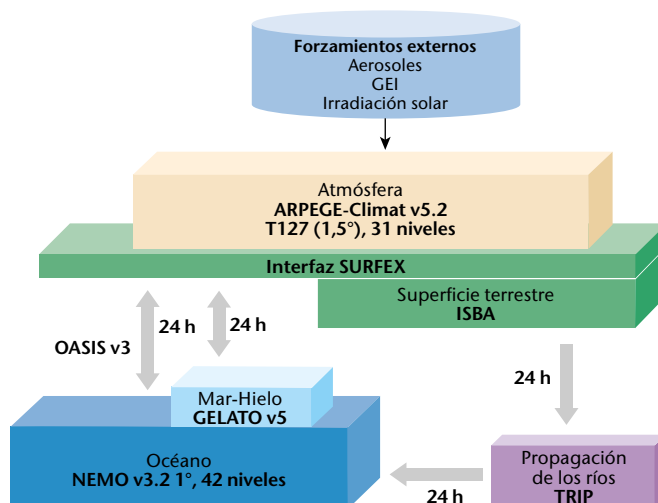


Figura 6.2. Ejemplo de gráfico que muestra los componentes del sistema Tierra de un modelo diseñado para efectuar simulaciones climáticas

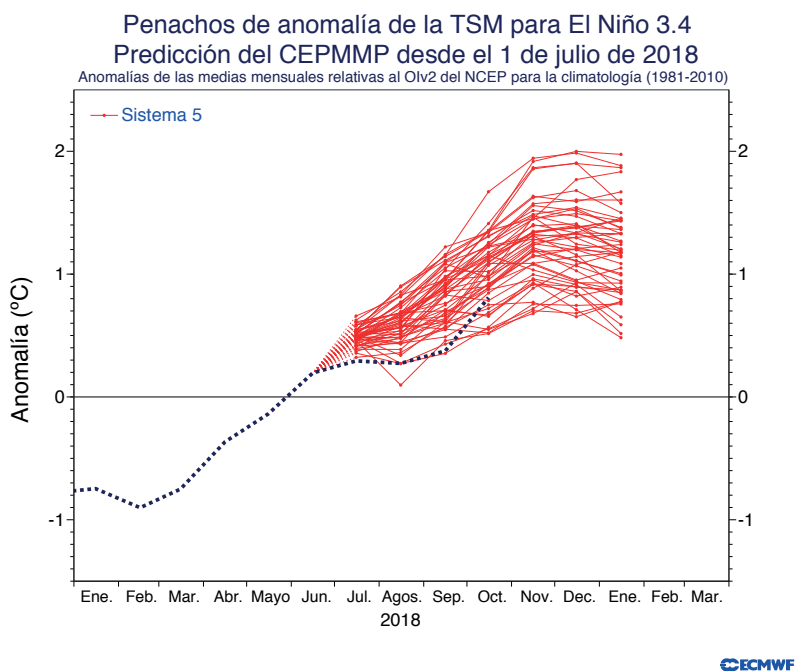
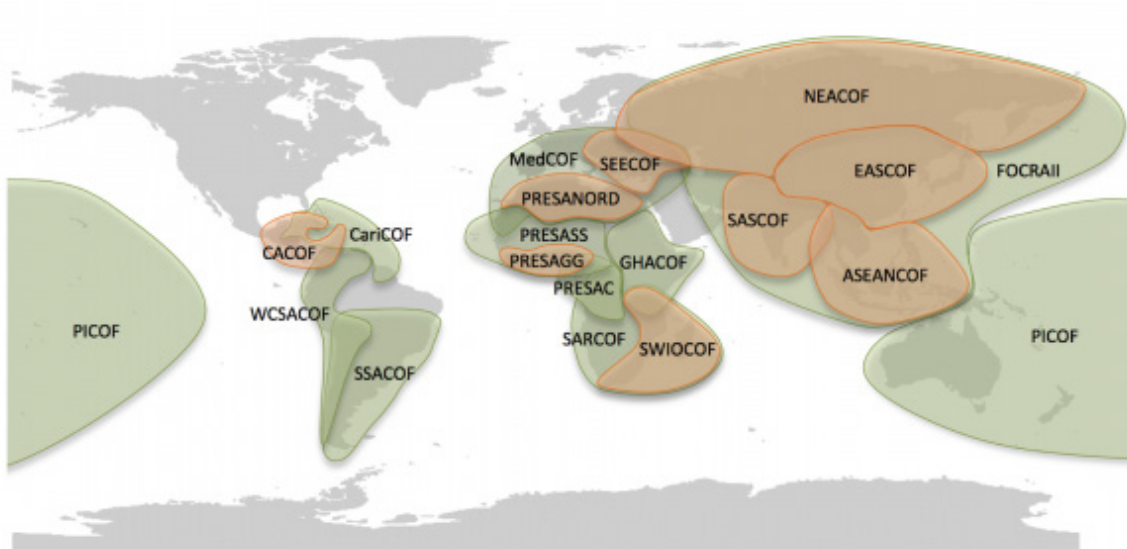


Figura 6.3. Ejemplo de penachos que representan la dispersión de una predicción estacional (por ejemplo, penachos de El Niño)



**Figura 6.4. Ejemplo de productos de foros regionales sobre la evolución probable del clima (predicción basada en el consenso)**

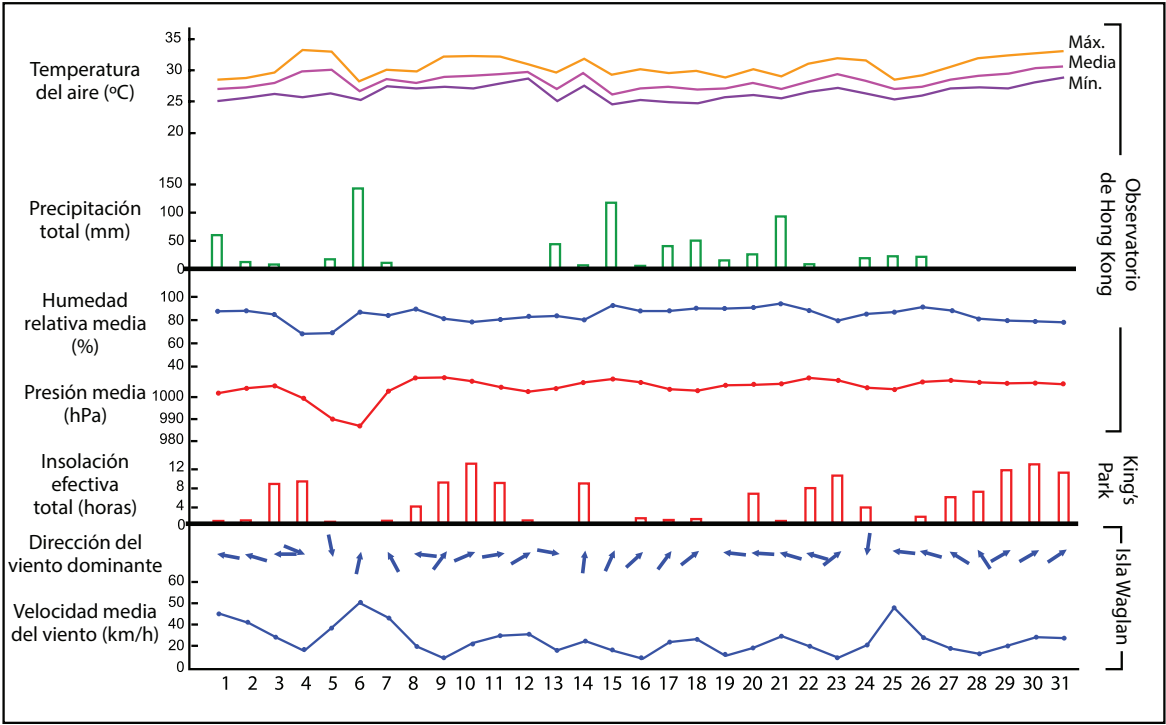


Figura 6.6. Ejemplo de presentación gráfica de los valores diarios de varios elementos

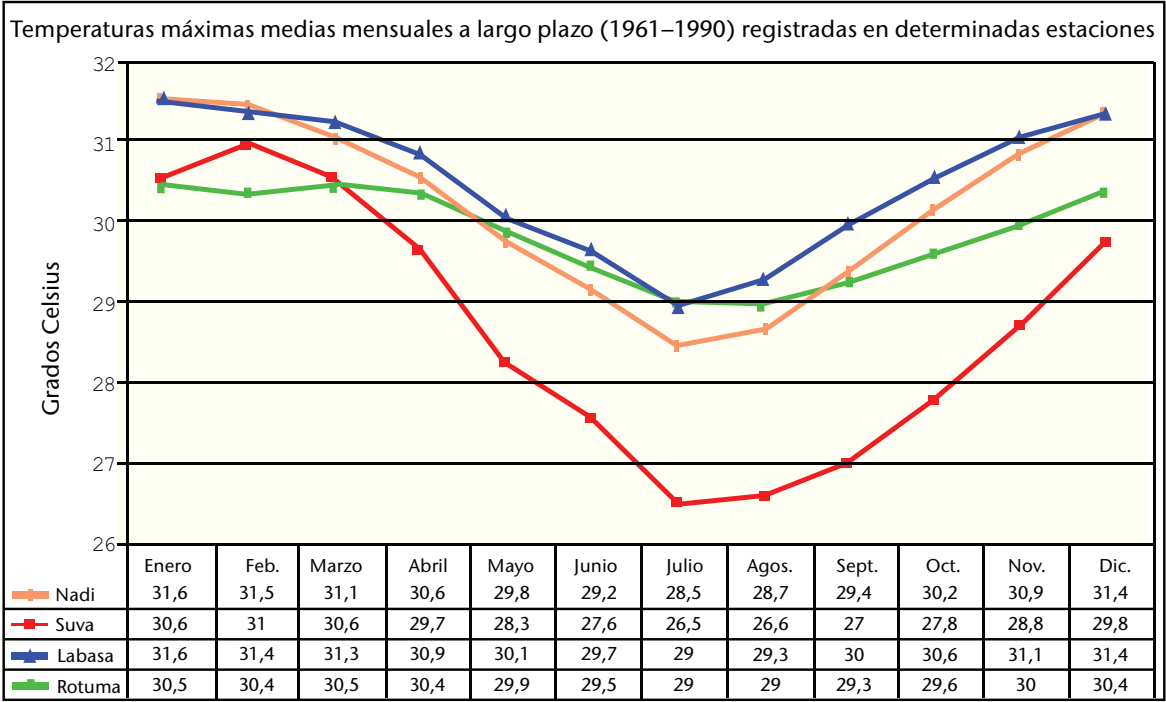


Figura 6.7. Ejemplo de gráfico lineal y cuadro de los valores de la temperatura correspondientes a varias estaciones

| LAGO MELVERN, KANSAS (145210)                                |      |      |      |      |      |       |       |       |       |      |      |      |       |
|--------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| Resumen del período de registro del clima mensual            |      |      |      |      |      |       |       |       |       |      |      |      |       |
| Período de registro: 1 de mayo de 1973 a 30 de abril de 2000 |      |      |      |      |      |       |       |       |       |      |      |      |       |
|                                                              | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | Mayo | Junio | Julio | Agos. | Sept. | Oct. | Nov. | Dic. | Anual |
| Temperatura máxima media (°F)                                | 37,3 | 43,4 | 55,3 | 65,3 | 74,1 | 82,9  | 89,1  | 87,9  | 79,6  | 68,5 | 53,6 | 42,1 | 64,9  |
| Temperatura mínima media (°F)                                | 16,5 | 21,3 | 32,0 | 42,5 | 53,0 | 62,4  | 67,5  | 65,0  | 55,4  | 44,4 | 32,5 | 22,0 | 42,9  |
| Precipitación total media (pulgadas)                         | 0,95 | 1,20 | 2,58 | 3,33 | 5,06 | 5,24  | 4,28  | 3,69  | 3,81  | 3,00 | 2,62 | 1,41 | 37,17 |
| Caída media de la nieve (pulgadas)                           | 2,5  | 1,8  | 0,5  | 0,0  | 0,0  | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0  | 0,4  | 0,4  | 5,5   |
| Altura media de la nieve caída (pulgadas)                    | 1    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0    | 0    | 0    | 0     |

**Porcentaje de observaciones posibles relativas al período de registro:**  
 Temp. máx.: 95,9 % Temp. mín.: 96,2 % Precipitación: 96 % Nieve caída: 89,3 % Altura de la nieve: 91 %

Figura 6.8. Ejemplo de presentación tabular de un resumen del clima mensual

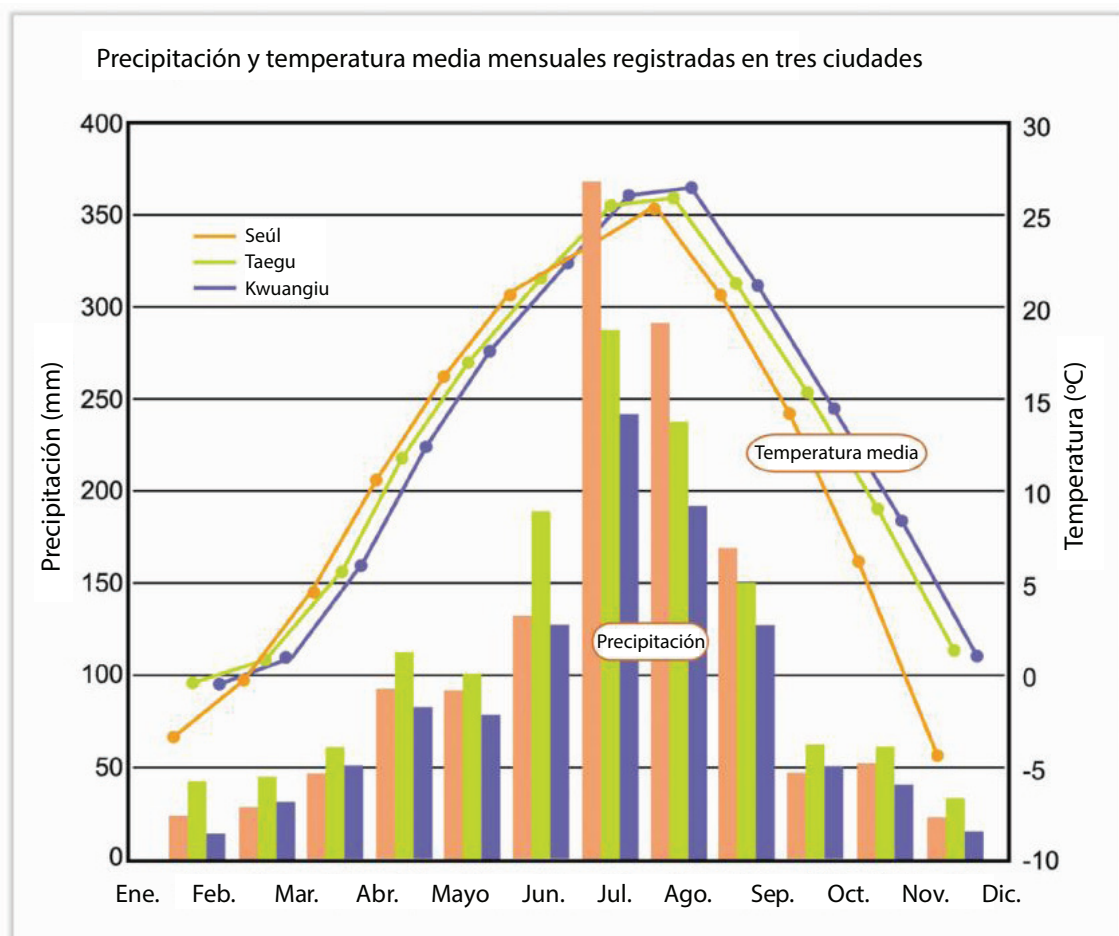


Figura 6.9. Ejemplo de diagrama compuesto de barras y líneas relativo a varios elementos y estaciones

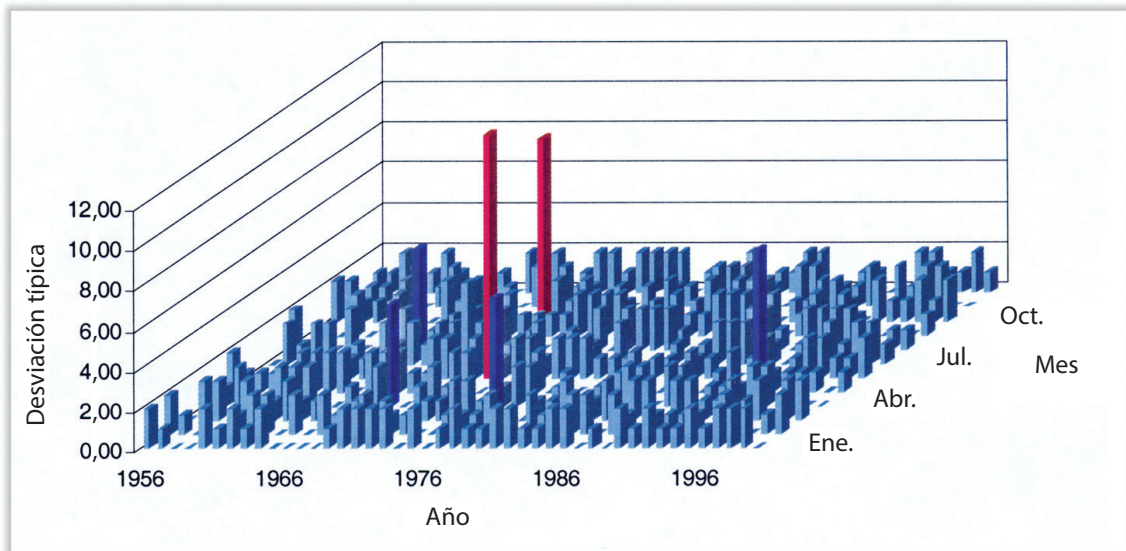


Figura 6.10. Ejemplo de presentación tridimensional que destaca los valores anómalos

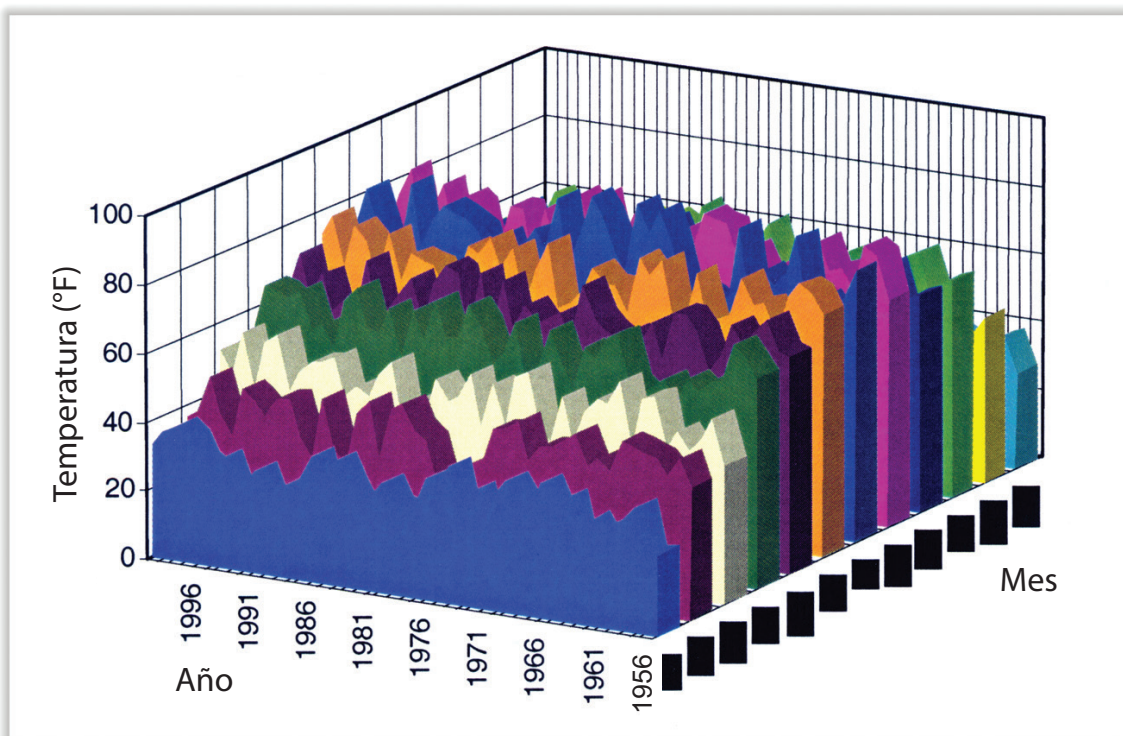


Figura 6.11. Ejemplo de presentación tridimensional que destaca las series temporales de los valores mensuales correspondientes a un determinado año



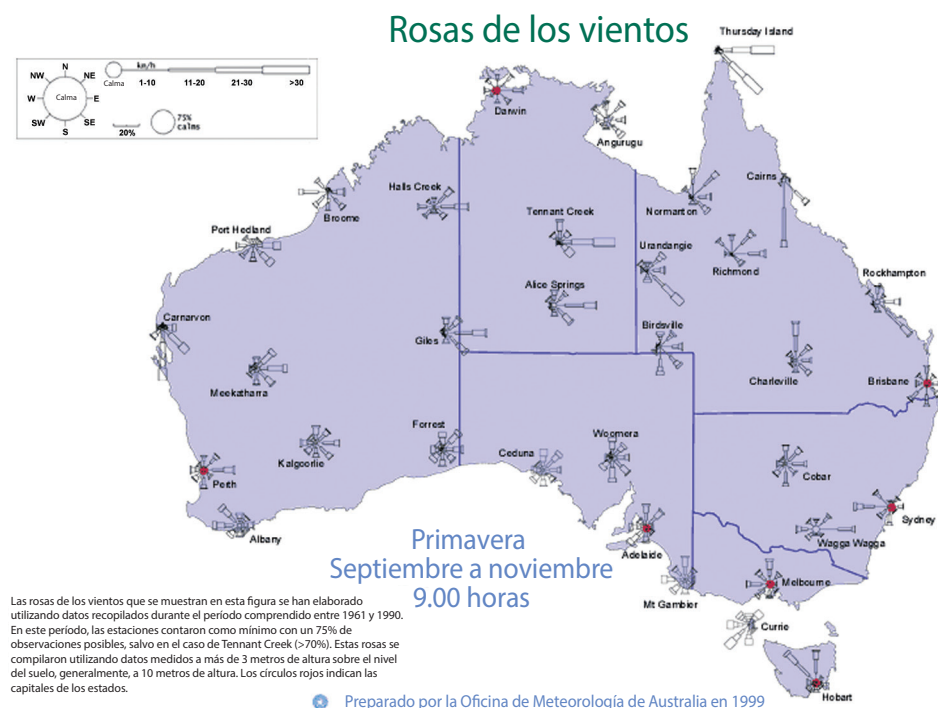


Figura 6.12. Ejemplo de presentación cartográfica simbólica del viento

## Monitor de sequías en los Estados Unidos

2 de octubre de 2018  
Publicado el jueves 4 de octubre de 2018  
Válido a las 8 am EDT

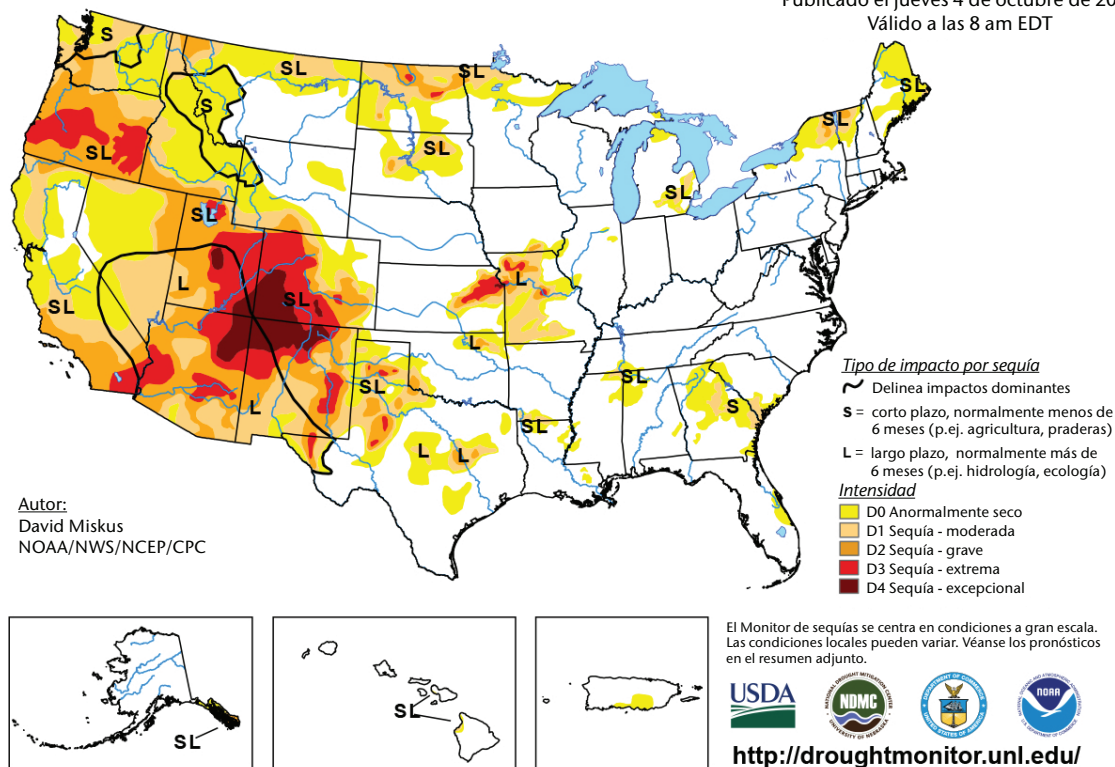


Figura 6.13. Mapa de curvas de nivel de las categorías de sequía y sus repercusiones

## REFERENCIAS

- Dake, C. y otros, 2004: "Predictability of El Niño over the past 148 years", en *Nature*, 428 (2004):733–736.
- Hamill, T. M., G. T. Bates, J. S. Whitaker, D. R. Murray, M. Fiorino, T. J. Galarneau (Jr.), Y. Zhu y W. Lapenta, 2013: "NOAA's second-generation global medium-range ensemble reforecast data set", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 1553-1565.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2000: *IPCC Special Report: Emissions Scenarios – Summary for Policymakers*.
- , 2013: "Resumen para Responsables de Políticas", en *Cambio climático 2013: Bases físicas*. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge (Reino Unido) y Nueva York (Estados Unidos de América), Cambridge University Press.
- , 2013: Anexo III: "Glosario" [Planton, S. (ed.)], en *Cambio climático 2013: Bases físicas*. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley, eds.). Cambridge (Reino Unido) y Nueva York (Estados Unidos de América), Cambridge University Press.
- Katragkou, E., M. García-Díez, R. Vautard, S. Sobolowski, P. Zanis, G. Alexandri, R. M. Cardoso, A. Colette, J. Fernandez, A. Gobiet, K. Goergen, T. Karacostas, S. Knist, S. Mayer, P. M. M Soares, I. Pytharoulis, I. Tegoulis, A. Tsikerdeakis y D. Jacob, 2015: "Regional climate hindcast simulations within EURO-CORDEX: Evaluation of a WRF multi-physics ensemble", en *Geoscientific Model Development*, 8, 603-618, <https://www.geosci-model-dev.net/8/603/2015/>.
- Organización Meteorológica Mundial, 2009: *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation* (WMO/TD-No. 1500, WCDMP-No. 72). Ginebra.
- , 2012: *Directrices sobre los sistemas de predicción por conjuntos y la predicción* (OMM-Nº 1091). Ginebra.
- , 2016: *Foros regionales sobre la evolución probable del clima*, [https://library.wmo.int/opac/doc\\_num.php?explnum\\_id=3191](https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3191).
- , 2017: *Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción* (OMM-Nº 485). Ginebra.
- Base de datos METEOTERM de la OMM, [http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm\\_wmo\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm_wmo_en.html).

## LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- Sociedad Meteorológica de Estados Unidos, 1993: "Guidelines for using color to depict meteorological information", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74:1709–1713.
- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett y P.D. Jones, 2006: "Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850", en *Journal of Geophysical Research*, 111:D12106.
- Dunn, R.J.H., M.G. Donat y L. Alexander, 2014: "Investigating uncertainties in global gridded data sets of climate extremes", en *Climate of the Past*, 10 (6):2171-2199, doi:10.5194/cp-10-2171-2014.
- Dunn, R.J.H., K.M. Willett, A. Ciavarella y P.A. Stott, 2017: "Comparison of land surface humidity between observations and CMIP5 models", en *Earth System Dynamics*, 8 (3):719-747, doi:10.5194/esd-8-719-2017.
- Giorgi, F., C. Jones y G. R. Asrar, 2009: "Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework", en *WMO Bulletin* 58 (3):175-183.
- Giorgi, F. y W.J. Gutowski (Jr.), 2015: "Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative", en *Annual Review of Environment and Resources*, volumen 40:467-490, doi:10.1146/annurev-environ-102014-021217.
- Gonçalves, M., P. Martinho, y C. Guedes Soares, 2016: "A hindcast study on wave energy variability and trends in Le Croisic, France", en *Progress in Renewable Energies Offshore*. Actas de la Segunda Conferencia Internacional sobre Energías Renovables Marinas (RENEW2016), Lisboa (Portugal), 24 a 26 de octubre de 2016. CRC Press.
- Gutowski, W. J. (Jr.), F. Giorgi, B. Timbal, A. Frigon, D. Jacob, H.-S. Kang, K. Raghavan, B. Lee, C. Lennard, G. Nikulin, E. O'Rourke, M. Rixen, S. Solman, T. Stephenson y F. Tangang, 2016: "WCRP COordinated Regional Downscaling EXperiment (CORDEX): A diagnostic MIP for CMIP6", en *Geoscientific Model Development*, 9, 4087-4095.

- Hargreaves, G.H., 1975: "Moisture availability and crop production", en *Transaction of the ASAE*, 18:980-984.
- Hofstra, N., M. New y C. McSweeney, 2010: "The influence of interpolation and station network density on the distributions and trends of climate variables in gridded daily data", en *Climate Dynamics*, 35 (5):841-858, doi:10.1007/s00382-009-0698-1.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2014: *The Fifth Assessment Report (AR5)*, <https://ipcc.ch/report/ar5>.
- Jones, P.D., M. New, D.E. Parker, S. Martin y I.G. Rigor, 1999: "Surface air temperature and its changes over the past 150 years", en *Reviews of Geophysics*, 37:173-199.
- Khambete, N.N., 1992: "Agroclimatic classification for assessment of the crop potential of Karnataka", en *Mausam*, 43(1):91-98.
- McEvoy, D.J., J.F. Mejia y J.L. Huntington, 2014: "Use of an observation network in the Great Basin to evaluate gridded climate data", en *Journal of Hydrometeorology*, 15 (5):1913-1931, doi:10.1175/JHM-D-14-0015.1.
- Peterson, T.C., 2005: "Climate change indices", en *WMO Bulletin*, 54:83-86.
- Peterson, T.C. y M.J. Manton, 2008: "Monitoring changes in climate extremes: A tale of international cooperation", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89:1266-1271.
- Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fiechter, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi y K.E. Taylor, 2007: "Climate models and their evaluation", en *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller, eds.). Cambridge (Reino Unido) y Nueva York (Estados Unidos de América), Cambridge University Press.
- Rayner, N.A., P. Brohan, D.E. Parker, C.K. Folland, J.J. Kennedy, M. Vanicek, T. Ansell y S.F.B. Tett, 2006: "Improved analyses of changes and uncertainties in marine temperature measured *in situ* since the mid-nineteenth century: The HadSST2 dataset", en *Journal of Climate*, 19:446-469.
- Sarker, R.P. y B.C. Biswas, 1988: "A new approach to agroclimatic classification to find out crop potential", en *Mausam*, 39(4):343-358.
- Stouffer, R. J., V. Eyring, G.A. Meehl, S. Bony, C. Senior, B. Stevens y K.E. Taylor, 2017: "CMIP5 scientific gaps and recommendations for CMIP6", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98 (1):95-105, doi:10.1175/BAMS-D-15-00013.1.
- Taylor, K.E., R. J. Stouffer y G.A. Meehl, 2012: "An overview of CMIP5 and the experiment design", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (4):485-498.
- Tufte, E.R., 1990: *Envisioning Information*. Cheshire, Connecticut, Graphic Press.
- Van Vuuren, D.P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, Kram, T. Kram, V. Krey, J.F. Lamarque y T. Masui, 2011: "The representative concentration pathways: An overview", en *Climatic Change*, 109, 5-31, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.
- Von Storch, H. y Navarra, A. (eds.), 2013: *Analysis of climate variability: Applications of statistical techniques*. Actas de un curso de otoño organizado por la Comisión de las Comunidades Europeas, Elba (Italia), 30 de octubre a 6 de noviembre de 1993. Springer Science & Business Media.
- Wikipedia, 2017, <https://en.wikipedia.org/wiki/Backtestin>.

## CAPÍTULO 7. PRESTACIÓN DE SERVICIOS

### 7.1 INTRODUCCIÓN

Los servicios climáticos aportan información, productos o actividades relacionados con el clima para ayudar a las personas y organizaciones a adoptar decisiones. Un servicio se define como el producto que se suministra y las actividades relacionadas con las personas, el proceso y la tecnología de la información necesarios para suministrarlo, o como una actividad (por ejemplo, el asesoramiento y la interpretación de la información climática) que se lleva a cabo con el objetivo de satisfacer las necesidades de un usuario o que puede llevar a cabo un usuario (véase *La estrategia de prestación de servicios de la OMM y su plan de aplicación* (OMM-Nº 1129), secciones 4.1 y 4.2). Idealmente, un servicio debería basarse en el conocimiento de las necesidades del usuario; debería aportar información, productos y asesoramiento adaptados al usuario en lo que respecta al tiempo, el formato o el contenido, y basarse en el diálogo con el usuario.

Para ser eficaces, los servicios deberían tener las siguientes características:

- Credibilidad: para que el usuario sienta confianza al utilizarlos en la toma de decisiones;
- Disponibilidad y puntualidad: para que estén listos donde y cuando los necesite el usuario;
- Seguridad y fiabilidad: para que se suministren sistemáticamente a tiempo y de acuerdo con las especificaciones requeridas por el usuario;
- Utilizabilidad: para que se presenten en formatos específicos para el usuario de modo que el cliente pueda hacer un uso pleno de ellos;
- Utilidad: capaces de responder adecuadamente a las necesidades del usuario;
- Expansibilidad: aplicables a diferentes tipos de servicios;
- Sostenibilidad: asequibles y coherentes a lo largo del tiempo;
- Capacidad de respuesta y flexibilidad: adaptables a los cambios en las necesidades del usuario;
- Autenticidad: para garantizar que sean aceptados por las partes interesadas en un contexto de toma de decisiones determinado.

Esos servicios requieren datos de gran calidad procedentes de bases de datos nacionales e internacionales, así como mapas, análisis de riesgo y vulnerabilidad, evaluaciones, y proyecciones y escenarios de largo plazo. En función de las necesidades del usuario, tales datos y productos de información pueden ser utilizados conjuntamente con otros datos no meteorológicos, por ejemplo, datos sobre producción agrícola, tendencias de salud, distribución demográfica en áreas de alto riesgo, mapas de carreteras e infraestructura para la entrega de mercancías, y otras variables socioeconómicas (véase *La estrategia de prestación de servicios de la OMM y su plan de aplicación* (OMM-Nº 1129), sección 4.2). La prestación de servicios es un proceso continuo y cíclico destinado a crear y suministrar servicios específicos para el usuario (véase la figura 7.1). Consta de las cuatro etapas siguientes:

**Etapla 1:** la identificación de los usuarios y la comprensión de sus necesidades, así como la comprensión del papel que desempeña la información climática en los diferentes sectores;

**Etapla 2:** la participación de usuarios, proveedores, suministradores y asociados en la creación y el desarrollo de servicios y medidas para garantizar que se atienden las necesidades de los usuarios;

**Etapas 3:** la elaboración y difusión de datos, productos e información (es decir, servicios) que sean adecuados para la consecución de un fin determinado y respondan a las necesidades de los usuarios;

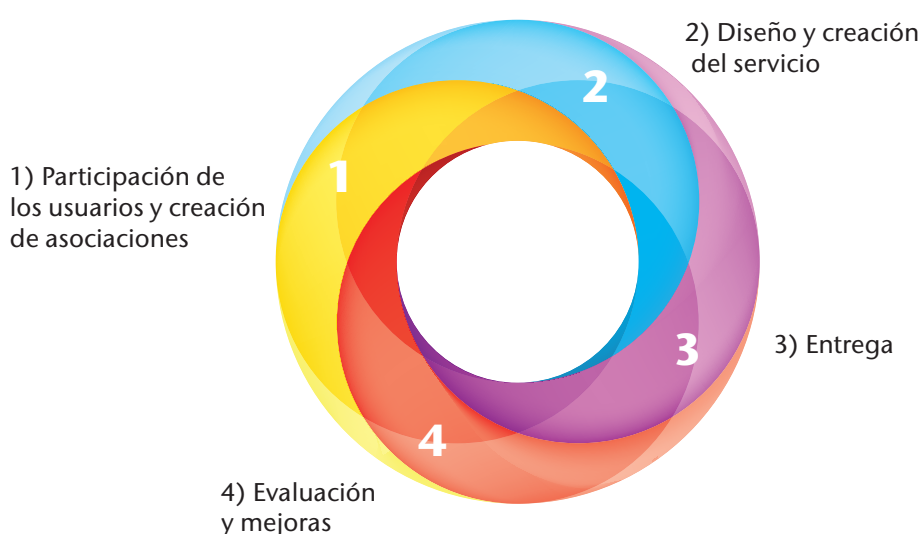
**Etapas 4:** la recopilación de observaciones de los usuarios y la elaboración de indicadores de medida del cumplimiento para evaluar y mejorar constantemente los productos y servicios.

El Marco Mundial para los Servicios Climáticos (MMSC) se creó para ofrecer una plataforma fiable, integrada y única que presta orientación y apoyo a las actividades desarrolladas en las esferas sensibles al clima (véase el *Plan de ejecución del Marco Mundial para los Servicios Climáticos*, sección 1.3). Su finalidad es ayudar a la sociedad a gestionar mejor los riesgos y las oportunidades derivados de la variabilidad del clima y el cambio climático. El Marco hace especial hincapié en la participación de los usuarios y en el desarrollo de la capacidad, y es de esperar que el compromiso de todos los asociados con ese esfuerzo concertado reporte el máximo beneficio para todos los usuarios.

## 7.2 USUARIOS Y USOS DE LA INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA

Los usuarios de servicios climáticos son muy diversos y comprenden desde niños en edad escolar hasta instancias normativas mundiales. Abarcan diversos grupos, como el personal de los medios de comunicación e información pública, agricultores, fuerzas armadas, departamentos gubernamentales, personal de empresas e industrias, gestores de recursos hídricos y eléctricos, consumidores, turistas, juristas, funcionarios de la salud pública, organizaciones humanitarias y de socorro y servicios meteorológicos. Sus necesidades pueden ir de un simple interés en el tiempo y el clima a un proyecto escolar, el diseño de un edificio, actividades agrícolas, la gestión de recursos hídricos, el funcionamiento de un sistema de aire acondicionado o una presa grande, la planificación de la producción y distribución de energía o la preparación para casos de escasez de alimentos o agua y las medidas de respuesta al respecto.

El actual interés en el cambio climático y sus repercusiones ha creado una necesidad adicional de información climática. En el pasado, los productos climáticos se limitaban principalmente a dar información sobre el entorno físico de la atmósfera cerca de la superficie de la Tierra. Hoy en día, los usuarios pueden necesitar información sobre muchos más aspectos del conjunto del sistema climático y el sistema terrestre (tierra sólida, aire, mar, biosfera y superficie terrestre, y hielo). Actualmente, los datos relacionados con el clima se usan para describir, representar y predecir tanto el comportamiento del conjunto del sistema climático (incluido el efecto de la actividad



**Figura 7.1. Cuatro etapas de un proceso continuo y cíclico para la creación y el suministro de servicios**



humana en el clima) como la relación entre el clima y otros aspectos del entorno natural y la sociedad humana. Existe, por lo tanto, una necesidad cada vez mayor de vigilar y describir el clima detalladamente, tanto en términos de escalas espaciales como temporales, al tiempo que los fenómenos actuales se sitúan en diversas perspectivas históricas. Se están recopilando series de datos climáticos de referencia de alta calidad para los que se han concebido técnicas estadísticas complejas de aseguramiento de la calidad. Al tiempo que se compilan esas series de datos, se están estableciendo procedimientos para detectar datos anómalos y, de ser posible, hacer los ajustes pertinentes, y dar cuenta de la falta de homogeneidad, por ejemplo, cambios en los instrumentos o en la ubicación de las estaciones de observación. Los investigadores y demás usuarios expertos de productos climáticos también están sumamente interesados en los metadatos para ayudar a interpretar y analizar la homogeneidad y la calidad de los datos.

Los usos que se hacen de la información climatológica pueden clasificarse en dos grandes categorías: usos estratégicos y usos tácticos. Los usos estratégicos son aquellos en los que los productos contribuyen a la planificación y el diseño generales a largo plazo de proyectos y políticas. La adaptación al cambio climático se está convirtiendo en algo habitual y en un componente necesario para la planificación a todos los niveles. En el contexto de la adaptación al cambio climático, los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) tienen un papel esencial en la planificación del desarrollo nacional de casi todos los sectores (véase *Climate Services for Supporting Climate Change Adaptation* (WMO-No. 1170)). Los tipos de información que normalmente se requieren para fines estratégicos son los análisis de probabilidad y las evaluaciones de riesgo de fenómenos meteorológicos para las especificaciones y normas relativas al diseño, los resúmenes de las condiciones históricas para disponer de información básica sobre las condiciones del clima en el pasado, y escenarios climáticos que permitan indicar la evolución probable en el futuro. Un ejemplo del uso estratégico de la información climática es un análisis de datos climáticos para diseñar una presa. Los usos tácticos son aquellos en los que los productos y los datos contribuyen a resolver problemas inmediatos y concretos a corto plazo. La información que normalmente se proporciona para los usos tácticos comprende copias de las observaciones oficiales de la ocurrencia de un fenómeno meteorológico, resúmenes de datos históricos y la ubicación de un fenómeno en un contexto histórico. Un ejemplo de uso táctico es el empleo de análisis de datos de observación recientes para ayudar a gestionar el uso de agua durante un episodio de sequía. A veces los usos pueden ser estratégicos y tácticos a la vez. Por ejemplo, el cálculo de las probabilidades de la velocidad y la dirección del desplazamiento de las tormentas tropicales a partir de datos históricos de las tormentas constituye un uso estratégico. Ahora bien, cuando la misma información se emplea para predecir el desplazamiento de una tormenta que se está produciendo en el momento presente, constituye un uso táctico.

El uso de información climática puede abarcar, aunque no exclusivamente, lo siguiente:

- la supervisión de determinadas actividades que dependen de las condiciones meteorológicas (por ejemplo, el consumo de combustible para calefacción y refrigeración, los niveles de contaminación atmosférica que exceden determinados umbrales, la variabilidad en la venta de mercancías o la inflación en los mercados de productos básicos como consecuencia de las sequías);
- la predicción del comportamiento de los sistemas sectoriales que reaccionan ante los fenómenos meteorológicos en un tiempo de respuesta conocido y en los que la información sobre las condiciones meteorológicas y climáticas del pasado reciente permite predecir en cierto grado las repercusiones en los distintos sectores (por ejemplo, la producción y el consumo de energía, las previsiones para reponer existencias, la producción de cultivos, las enfermedades de las plantas, los sistemas de aviso de olas de calor y riesgos para la salud, la seguridad alimentaria, y el suministro y la demanda de agua);
- la acreditación de que ha ocurrido un fenómeno meteorológico, como una tormenta, vientos fuertes, heladas y sequías, para pólizas de seguros y otros fines;
- el seguimiento que permite determinar el carácter de un fenómeno o período concreto, especialmente las desviaciones respecto de las condiciones normales (por ejemplo, la intensidad de la sequedad o las lluvias extremas);



- el diseño de equipos cuya eficacia y eficiencia dependen imperativamente de información sobre la climatología local (como obras de ingeniería civil, sistemas de aire acondicionado y sistemas de riego y drenaje);
- estudios de impacto, como la información sobre las condiciones iniciales con el fin de evaluar las consecuencias de instalar una central eléctrica u otro tipo de industria que pueda afectar a la calidad del aire;
- el estudio de la influencia de las condiciones meteorológicas en los sectores económicos, como el transporte público y el turismo;
- la planificación y la gestión de riesgos para prestar servicios comunitarios a la sociedad, como el suministro de agua y energía, y la preparación y respuesta para casos de emergencia;
- el apoyo para la adaptación al cambio climático.

Para promover el uso de los servicios climáticos, es importante la participación efectiva de los usuarios en el proceso de desarrollo y prestación de servicios (véase *La estrategia de prestación de servicios de la OMM y su plan de aplicación* (OMM-Nº 1129)). Dicha participación fomentará el conocimiento de las necesidades de los usuarios y también permite entender mejor el efecto de los servicios climáticos en la protección de la vida y los bienes, la conservación del medio ambiente y la promoción del desarrollo económico y la prosperidad. Gracias a esos conocimientos compartidos se pueden conseguir productos y servicios más eficaces, que se ajusten mejor a la demanda externa y se adecuen a los fines a los que están destinados.

Una prestación eficaz de servicios relacionados con el clima se atiene a los principios siguientes:

- la participación de los usuarios debe comenzar en una etapa temprana del desarrollo del producto y los servicios;
- los comentarios de los clientes son esenciales a lo largo de todo el proceso para diseñar y prestar servicios eficaces;
- el intercambio de mejores prácticas entre proveedores y usuarios se traduce en una concepción y realización eficaz y eficiente de la prestación de servicios;
- las asociaciones con otras organizaciones internacionales y regionales que también se dedican a la prestación de servicios son decisivas para aprovechar al máximo la información climática en la adopción de decisiones. En la figura 7.2 se muestran los elementos necesarios para avanzar hacia una cultura orientada al servicio.

### 7.3 INTERACCIÓN CON LOS USUARIOS

La prestación de servicios climáticos puede tener un fuerte componente didáctico y comunicativo. Muchas personas que necesitan información climática tienen una comprensión limitada de la ciencia meteorológica y los conceptos afines. Por lo tanto, tal vez no sepan ni qué información necesitan realmente ni cómo utilizarla de la mejor manera. Es posible que muchos usuarios no sepan cuál es la mejor manera de incorporar la información climática en sus procesos de adopción de decisiones. A menudo se limitan a solicitar los productos que saben que están disponibles. Los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales deben desarrollar instrumentos y métodos más detallados en colaboración con los usuarios. Esto contribuirá a integrar a los usuarios en el proceso de prestación de servicios (véase *La estrategia de prestación de servicios de la OMM y su plan de aplicación* (OMM-Nº 1129), capítulos 3 y 4).

Incluso la información de más alta calidad publicada de manera oportuna tendrá un escaso efecto si no genera la respuesta adecuada de los usuarios. La utilidad de la información climática depende fundamentalmente de cómo se transmita a los usuarios y de la respuesta de los usuarios

a dicha información, y en última instancia, de su impacto social y económico. Si la información disponible no se aprovecha como es debido, puede dársele más valor mediante la mejora de la comunicación entre los proveedores y usuarios. Por consiguiente, una prestación de servicios eficaz consiste en suministrar productos y servicios que sean de utilidad para los usuarios y los clientes. Los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales no deberían evaluar las necesidades del usuario de forma aislada, sino en colaboración con usuarios, proveedores y asociados. Tanto el proveedor como el usuario de servicios deben estar al corriente de los plazos que se necesitan para la producción del servicio y para el proceso de adopción de decisiones. Para tener un servicio adecuado es necesario que todas las partes involucradas hayan llegado a un acuerdo, ya sea implícito o explícito, y que este contemple todos o algunos de los siguientes elementos (véase *La estrategia de prestación de servicios de la OMM y su plan de aplicación* (OMM-Nº 1129), sección 4.1):

- las necesidades presentes y cambiantes de los usuarios;
- las capacidades del proveedor, incluidos sus puntos fuertes y limitaciones;
- los tipos de servicios que se prestarán y la manera en que se hará;
- la forma en que se utilizarán los servicios;
- las expectativas de resultados aceptables y del nivel de rendimiento de los proveedores;
- costos o niveles de esfuerzo aceptables;
- los riesgos inherentes a la aplicación de la información en los procesos de adopción de decisiones.

El servicio climático debería garantizar su competencia para la comunicación, interpretación y utilización de la información climática. El personal del servicio constituye el nexo entre los aspectos climatológicos técnicos de los datos, los análisis, las proyecciones y los escenarios, y los



**Figura 7.2. Los seis elementos necesarios para avanzar hacia una cultura más orientada al servicio**

usuarios de la información, que tal vez no tengan el nivel de conocimientos técnicos suficiente. El personal de un servicio climático debería estar preparado para responder a solicitudes de datos con información adicional sobre los emplazamientos, los elementos y los instrumentos, las definiciones matemáticas de diversos parámetros, las formas en que se efectúan las observaciones y la ciencia de la meteorología y la climatología en particular. Los mecanismos de apoyo a los usuarios deberían formalizarse y ser bien conocidos por los usuarios. El personal de un servicio climático debería desarrollar una amplia gama de aptitudes y conocimientos técnicos o tener acceso a personas con suficiente pericia.

A veces, los usuarios programan reuniones y actividades a las que invitan al personal de los servicios climáticos. La aceptación de esas invitaciones fomenta relaciones más estrechas y permite al personal del servicio conocer a los usuarios y sus problemas. Es importante y muy gratificante participar tanto como sea posible en las actividades de los usuarios. Normalmente, los comentarios de los usuarios se traducen en mejores productos, nuevas aplicaciones y una difusión más eficiente e inclusiva de la información climática. Es fundamental mantener una comunicación continua o frecuente con los usuarios para cerciorarse de que los productos existentes siguen respondiendo a sus necesidades y para determinar de qué manera pueden modificarse los productos con el fin de que estos queden satisfechos.

El personal de atención al cliente debería ser cortés y diplomático y reconocer que es importante prestar servicios profesionales; los usuarios pueden tener necesidades urgentes por diversos motivos. Idealmente, el servicio climático debería disponer de buenas comunicaciones básicas con servicios de tecnología y formación para brindar apoyo al personal de atención al cliente. El personal de atención al cliente lo constituyen personas con las que el público interactúa directamente, y de estas personas depende la reputación del proveedor de servicios.

Deberían anunciarse claramente puntos de contacto para diversos métodos de comunicación, junto con información sobre las normas del servicio, como el horario de atención al público y los tiempos de respuesta. Es importante ofrecer diferentes métodos de transmisión de la información. Es posible que los proveedores de servicios dispongan de un sistema moderno y eficaz de respaldo, pero tal vez no ocurra así en el caso muchos usuarios. Hoy en día, las comunicaciones y la tecnología modernas permiten transferir datos y entregar productos muy rápidamente por Internet, pero puede ser necesario contar con métodos de entrega alternativos en algunos países y en determinadas condiciones. Esto garantizará la sostenibilidad del servicio suministrado.

A menudo, un SMHN cuenta con múltiples oficinas y es posible que entre ellas se observen incoherencias en las normas, los formatos e incluso los productos. El contacto frecuente entre las oficinas es fundamental; se recomienda mantener reuniones presenciales periódicamente, que deberían programarse, por lo menos, una vez al año. Los procedimientos operativos centralizados y aplicables comúnmente y la utilización de bases de datos con una sola referencia contribuyen a garantizar la coherencia, así como también lo hace la correcta redacción de la documentación, las normas de calidad, las instrucciones y los manuales.

La aplicación de tarifas por el suministro de servicios puede resultar especialmente delicada para los usuarios y puede dar lugar a críticas y descontento si su implantación no es coherente o si se consideran excesivamente altas. Por lo tanto, es importante establecer una política clara y transparente en materia de tarifas de servicios con instrucciones para su aplicación. Ello puede implicar la adopción de una política formal basada en un conjunto de principios y la aplicación práctica de una serie de tarifas al uso directo de información por parte de los proveedores de servicios operativos. Esta política debería darse a conocer a todos aquellos que participan en la prestación de servicios, así como a los usuarios.

La prestación de servicios no termina una vez que se ha entregado el producto o servicio. Es necesario mantener la comunicación con el usuario y seguir fomentando su participación para garantizar que este reciba los servicios, actúe en consecuencia y obtenga el mayor provecho de ellos. Los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales deberían evaluar de principio a fin todo el proceso de prestación de servicios y los resultados correspondientes. El objetivo de esta evaluación es determinar los puntos fuertes del servicio y las áreas que necesitan mejoras en materia de eficacia, eficiencia, efectos, satisfacción y valor para las partes interesadas, clientes,

usuarios, asociados y empleados. Concretamente, los métodos de evaluación utilizados deberían ser (véase *La estrategia de prestación de servicios de la OMM y su plan de aplicación* (OMM-Nº 1129), sección 4.3):

- específicos: estar específicamente orientados a la esfera que se ha de cuantificar;
- cuantificables: capaces de recopilar datos precisos y completos;
- fáciles de procesar: que se puedan entender, interpretar y utilizar fácilmente;
- pertinentes: capaces de medir solamente los aspectos importantes y pertinentes para la finalidad y los objetivos de una organización. Un error común es cuantificar cada aspecto, lo que consume tiempo y produce resultados sin interés;
- oportunos: que puedan realizarse sin demoras;
- consensuados: la concertación de niveles aceptables de rendimiento forma parte de la evaluación de las necesidades del usuario o de la adecuación a la finalidad;
- de titularidad clara: los responsables deberían estar claramente identificados. Lo ideal es que los responsables tengan la capacidad, la influencia y los recursos necesarios para adoptar medidas que garanticen el cumplimiento de los objetivos;
- coherentes: los métodos de evaluación no deberían promover conductas que entren en conflicto entre sí.

Una de las formas de evaluar la satisfacción de los clientes es utilizar encuestas. Las encuestas pueden tener diversos niveles de formalidad, alcance y normalización, e ir desde visitas frecuentes de las personas encargadas de tratar con el cliente o talleres para los usuarios hasta ejercicios para recopilar grandes cantidades de información mediante encuestas normalizadas, realizadas por correo electrónico, por Internet o por teléfono. A la hora de recabar las opiniones de los usuarios, tanto los métodos formales como informales son apropiados y útiles. Las encuestas deben llevarse a cabo a intervalos regulares o tras la prestación de un servicio. Los resultados relativos a la satisfacción del usuario pueden ser importantes si se comparan con las entrevistas en las que se destacan las diferencias entre la percepción del cliente y el rendimiento técnico.

La interacción con los usuarios debería realizarse en el contexto de un marco de gestión de la calidad establecido por la dirección del servicio climático en función de las necesidades de los clientes (véase *Guidelines on Quality Management in Climate Services* (WMO-No. 1221), sección 2.2.1, tabla 2, y capítulo 6).

## 7.4 INFORMACIÓN Y DIFUSIÓN DE LOS PRODUCTOS Y SERVICIOS

En la prestación de servicios climáticos resulta fundamental dar prioridad al usuario. A medida que evolucionan las necesidades de los usuarios, las capacidades de los proveedores de servicios también deberían irse adaptando. Los métodos de distribución de los productos y servicios están sujetos a cambios, especialmente en la era de las modernas tecnologías de la información, y es importante que los Miembros sean capaces de responder rápidamente a estos cambios (véase *La estrategia de prestación de servicios de la OMM y su plan de aplicación* (OMM-Nº 1129), secciones 4.1 y 4.4).

La interacción entre usuarios y proveedores se da a múltiples niveles, y va desde los intercambios relativamente pasivos, a través de sitios web y de herramientas web, hasta intercambios mucho más activos y relaciones con fines más específicos. En función de las necesidades del usuario, la interacción puede consistir simplemente en el suministro de información, la entrega concreta de información sobre la base del diálogo o la prestación de un servicio muy adaptado

y específico. Estas categorías van de un mecanismo de entrega más pasivo a uno más activo, con el correspondiente aumento potencial de la cantidad de tiempo y gastos implicados en la prestación del servicio y su utilización.

El acierto con el que un usuario interpreta el servicio que se le ofrece depende en gran medida del modo en que se presenta y suministra la información. Cuando resulte práctico, los datos importantes deberían ilustrarse en forma visual acompañados de un texto que los describa, destaque y explique. La presentación debería ser lógica, clara, concisa y adaptada al usuario y a la finalidad con la que se hace. Por ejemplo, el estilo que se emplea para transmitir información climática a un investigador será diferente del de un artículo que se publique en un periódico o en una revista de gran tirada.

El método utilizado para publicar resúmenes de datos en un boletín climatológico periódico, destinado a una amplia gama de usuarios técnicos y no técnicos, debería ser diferente del que se emplea para preparar un informe sobre la interpretación de un problema concreto en la climatología aplicada. La información técnica destinada a usuarios que tengan un conocimiento limitado de las ciencias atmosféricas debería presentarse de una manera simple y comprensible, sin que deje de ser correcta desde el punto de vista científico. Es recomendable evitar la terminología científica especializada y los acrónimos, a no ser que se definan detalladamente.

Los usuarios más entendidos estarán mejor preparados para comprender información y presentaciones complejas, pero normalmente es aconsejable explicar los aspectos técnicos o científicos más importantes. Por lo tanto, los servicios climáticos deberán prever, examinar y comprender las necesidades de las instancias decisorias de los gobiernos, los sectores de la industria y el comercio y el público en general. Asimismo, deben garantizar que el proveedor de servicios climáticos esté capacitado para comprender los problemas de los usuarios y responder a sus preguntas con conocimientos actualizados y con profesionalidad.

El Marco Mundial para los Servicios Climáticos se creó para ofrecer una plataforma fiable, integrada y única que presta orientación y apoyo a las actividades desarrolladas en las esferas de inversión sensibles al clima, en particular la agricultura, la energía, la reducción de riesgos de desastre, la salud humana y los recursos hídricos, en apoyo a la adaptación al clima y la atenuación de sus efectos. La estructura del Marco se basa en cinco componentes o pilares. Dos de esos pilares son pertinentes para la difusión de servicios:

- la plataforma de interfaz de usuario: medio estructurado que permite a los usuarios, a los investigadores climáticos y a los proveedores de información sobre el clima interactuar en todos los niveles;
- el Sistema de Información de Servicios Climáticos: mecanismo que permitirá recopilar, almacenar y procesar de forma habitual información sobre el clima (pasado, presente y futuro), con el fin de generar productos y servicios que contribuyan a los procesos frecuentemente complejos de toma de decisiones, abarcando una gran diversidad de actividades y proyectos sensibles al clima.

El objetivo de la plataforma de interfaz de usuario es fomentar la eficacia para la adopción de decisiones relativas al clima velando por que se transmita, comprenda y utilice información correcta, oportuna y suficiente. La plataforma utiliza una amplia gama de métodos concebidos para promover el entendimiento mutuo, entre los que se incluyen comités establecidos oficialmente, grupos de trabajo, programas de pasantías, reuniones individuales, talleres, conferencias y equipos especiales interinstitucionales. También se emplea gran variedad de métodos de comunicación, divulgación y formación profesional. Estos comprenden emisiones de radio, los medios sociales y anuncios de servicio público, así como el uso de tecnologías tales como interfaces cartográficas, portales y servidores de información. En muchas esferas de esta labor resultaría oportuno aprovechar los mecanismos de diálogo afianzados o que están cobrando impulso, como los Foros regionales sobre la evolución probable del clima, los grupos de trabajo de enlace comunitario en el contexto de la gestión de desastres y los grupos de trabajo sobre las condiciones sanitarias a nivel nacional. La propuesta de mejorar la interacción entre usuarios y proveedores tiene por objeto conciliar la disponibilidad de información climática fidedigna con las necesidades de los usuarios en materia de información para ayudarlos a

adoptar decisiones. Esta comprensión mutua puede servir posteriormente para estructurar un servicio climático de extremo a extremo que puede dar lugar a la elaboración de productos útiles. Es más probable que los Miembros de la OMM que ya han establecido un sistema formal de control de la calidad se centren en cumplir las necesidades de los usuarios y otorguen a la gestión de la calidad una importancia clave en la prestación de servicios.

El Sistema de Información de Servicios Climáticos constituye un medio de transformar los resultados de la investigación y los avances tecnológicos en información climática mejorada para fines operativos. El Sistema comprende una infraestructura física de instituciones, capacidades y herramientas informáticas, y prácticas operativas. Junto con un equipo de profesionales, el Sistema desarrolla, elabora y difunde una amplia gama de productos y servicios de información climática utilizables a nivel mundial, regional y nacional.

## 7.5 COMERCIALIZACIÓN DE LOS SERVICIOS Y PRODUCTOS

La comunicación es crucial para transmitir una imagen positiva del valor de los servicios climáticos. Contribuye a crear conciencia de la necesidad de esos servicios y de las ventajas que traen consigo y ayuda a las personas y organizaciones a adoptar decisiones relativas al clima. Por lo tanto, la estrategia global de comunicación para el suministro de servicios climáticos debería incluir una lista de objetivos e indicar formas de lograrlos, utilizando una amplia variedad de métodos y medios de comunicación.

La comunicación es un aspecto importante de la comercialización, no solo la publicidad y la venta de servicios climáticos. También permite que los posibles usuarios descubran qué productos y servicios están disponibles, conozcan la utilidad de los servicios y productos, y comprendan mejor el valor de la información, como se indica en *La estrategia de prestación de servicios de la OMM y su plan de aplicación* (OMM-Nº 1129), sección 4.3). La comercialización, las relaciones públicas y la publicidad, y la promoción y difusión de información climática son fundamentales para el éxito de la mayoría de los servicios climáticos. Es poco probable que la información climática por sí sola sea suficiente; a menudo debe complementarse con información no climática para generar beneficios socioeconómicos. Es necesario promocionar los beneficios de utilizar un producto, dado que con frecuencia la importancia de la información climática no resulta evidente para quienes podrían beneficiarse de los productos ni para quienes aprueban los fondos para financiar los programas climáticos. Los beneficios y el valor de la utilización de los productos deben explicarse claramente en términos sociales y económicos. Es necesario realizar estudios para evaluar el valor de los servicios climatológicos. La responsabilidad de realizar dichos estudios no debería recaer únicamente en los climatólogos, sino que debería ser compartida entre todas las partes interesadas. Una manera de mostrar la eficacia de los servicios consiste en demostrar su valor a los usuarios.

Entre las cualidades que debe reunir un programa de comercialización y comunicación eficaz, cabe señalar:

- centrarse en las necesidades de los usuarios gracias a una mejor comprensión de sus requisitos y de la manera en que utilizan la información climática;
- crear capacidad entre los proveedores y los usuarios del servicio climático;
- determinar el mercado destinatario;
- promover los beneficios de los servicios y productos climáticos entre los usuarios;
- desarrollar un producto o servicio para responder a una necesidad concreta de un usuario y promover su aplicación para resolver los problemas de este;
- dar a conocer las cualidades profesionales del personal del servicio climático;



- escoger métodos de accesibilidad a los productos o de entrega de los mismos y ofrecer opciones al usuario;
- evaluar el valor económico de los productos y servicios;
- mantener informados a los usuarios recurriendo a la publicidad y las relaciones públicas;
- efectuar un seguimiento del grado de satisfacción de los usuarios y evaluar la calidad de servicio y los esfuerzos de comercialización;
- garantizar la credibilidad y la sostenibilidad de los servicios climáticos manteniendo la transparencia sobre la fiabilidad y las limitaciones de los productos y servicios ofrecidos.

Las sesiones de formación deberían incluir actividades de creación de capacidad que cubriesen todos los aspectos de la prestación de servicios. En ellas deberían abordarse cuestiones relativas a los usuarios de la información climática, sus procesos de adopción de decisiones y el modo en que aplican la información climatológica a esas decisiones (véase *Annex to the Implementation Plan of the Global Framework for Climate Services – Capacity Development*, capítulo 5). A menudo, los usuarios tienen una comprensión limitada de la calidad de los servicios que reciben, o incluso de qué están recibiendo exactamente y hasta qué punto la información es pertinente. Por lo tanto, también es muy recomendable impartir formación a los usuarios y clientes para que puedan obtener el máximo beneficio de esos productos y servicios y garantizar que comprendan plenamente las capacidades de los SMHN.

Las actividades de desarrollo de la capacidad suelen ser más eficaces cuando se centran en los servicios y la prestación de servicios y tienen en cuenta la infraestructura y los recursos humanos e institucionales necesarios para la prestación de esos servicios. Los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales podrán contribuir de manera más eficaz a los planes de desarrollo de sus países si los servicios que suministran se diseñan teniendo en cuenta las necesidades del usuario. Esto contribuirá a garantizar que los servicios sean apreciados por los usuarios y que los servicios meteorológicos e hidrológicos se mantengan y mejoren.

## REFERENCIAS

- Organización Meteorológica Mundial, 2014: *Implementation Plan of the Global Framework for Climate Services*. Ginebra.
- , 2014: *Annex to the Implementation Plan of the Global Framework for Climatic Services – Climate Service Information System Component*. Ginebra.
- , 2014: *Annex to the Implementation Plan of the Global Framework for Climate Services – Capacity Development*. Ginebra.
- , 2014: *La estrategia de prestación de servicios de la OMM y su plan de aplicación* (OMM-Nº 1129). Ginebra.
- , 2016: *Climate Services for Supporting Climate Change Adaptation - Supplement to the Technical Guidelines for the National Adaptation Plan Process* (WMO-No. 1170). Ginebra.
- , 2018: *Guidelines on Quality Management in Climate Services* (WMO-No. 1221). Ginebra.

## LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- Sociedad Meteorológica de Estados Unidos, 1993: "Guidelines for using color to depict meteorological information", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74:1709–1713.
- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett y P.D. Jones, 2006: "Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850", en *Journal of Geophysical Research*, 111:D12106.
- Hargreaves, G.H., 1975: "Moisture availability and crop production", en *Transaction of the ASAE*, 18:980–984.
- Jones, P.D., M. New, D.E. Parker, S. Martin y I.G. Rigor, 1999: "Surface air temperature and its changes over the past 150 years", en *Reviews of Geophysics*, 37:173–199.
- Khambete, N.N., 1992: "Agroclimatic classification for assessment of the crop potential of Karnataka", en *Mausam*, 43(1):91–98.
- MacCracken, M., 2002: "Do the uncertainty ranges in the IPCC and U.S. National Assessments account adequately for possibly overlooked climatic influences?", en *Climatic Change*, 52:13–23.
- Palmer, W.C., 1965: "Meteorological Drought". *Informe de investigación N° 45 de la Oficina Meteorológica*. Washington, D.C., Departamento de Comercio de los Estados Unidos de América.
- Peterson, T.C., 2005: "Climate change indices", en *WMO Bulletin*, 54:83–86.
- Peterson, T.C. y M.J. Manton, 2008: "Monitoring changes in climate extremes: A tale of international cooperation", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89:1266–1271.
- Rayner, N.A., P. Brohan, D.E. Parker, C.K. Folland, J.J. Kennedy, M. Vanicek, T. Ansell y S.F.B. Tett, 2006: "Improved analyses of changes and uncertainties in marine temperature measured *in situ* since the mid-nineteenth century: The HadSST2 dataset", en *Journal of Climate*, 19:446–469.
- Sarker, R.P. y B.C. Biswas, 1988: "A new approach to agroclimatic classification to find out crop potential", en *Mausam*, 39(4):343–358.
- Tufte, E.R., 1990: *Envisioning Information*. Cheshire, Connecticut, Graphic Press.
- United States Global Change Research Program Office (USGCRP), 2000: *Climate Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change*. Washington, D.C.
- Wang, B. y Z. Fan, 1999: "Choice of South Asian summer monsoon indices", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80:629–638.
- Wilhelm, W.W., K. Ruwe y M.R. Schlemmer, 2000: "Comparisons of three Leaf Area Index meters in a corn canopy", en *Crop Science*, 40:1179–1183.
-

## **ANEXO. ACTIVIDADES CLIMÁTICAS A NIVEL INTERNACIONAL**

### **1. COORDINACIÓN DE LAS ACTIVIDADES CLIMÁTICAS**

La Comisión de Climatología se ocupa de promover y facilitar actividades relativas al clima y su relación con el bienestar humano, las actividades socioeconómicas, los ecosistemas naturales y el desarrollo sostenible. Concretamente, la Comisión:

1. coordina y determina las necesidades generales y las normas relativas a las observaciones y a la recopilación, el archivo y el intercambio de datos de todos los componentes del Programa Mundial sobre el Clima;
2. determina las mejores prácticas para la gestión de datos climáticos, incluidos los datos obtenidos en tiempo casi real, los datos indirectos, los datos captados por teledetección y los metadatos (información sobre los datos);
3. fomenta la difusión de datos, productos y métodos en apoyo de la investigación, las aplicaciones, las evaluaciones del impacto y la vigilancia del sistema climático;
4. ayuda a elaborar declaraciones autorizadas sobre el clima, incluidos los boletines *El Niño/ La Niña* hoy y las declaraciones anuales sobre el estado del clima mundial;
5. evalúa y examina la elaboración y aplicación de predicciones climáticas con fines operativos;
6. establece las prioridades para estudiar los climas de los ecosistemas naturales y gestionados y para suministrar información climática con el fin de aliviar problemas que surgen a raíz de la influencia de las actividades humanas en los climas locales y regionales;
7. apoya la creación de capacidad y la transferencia de tecnología;
8. fomenta la investigación y la evaluación del papel que desempeña el clima en sectores sociales y económicos clave en colaboración con otras comisiones técnicas de la OMM, otros organismos de las Naciones Unidas e instituciones internacionales y regionales pertinentes;
9. evalúa la posibilidad de aplicar las predicciones estacionales y otros servicios climatológicos con miras al beneficio social y económico, incluidas la reducción del riesgo de peligros relacionados con el clima y la utilización óptima del clima como recurso, y
10. brinda asesoramiento sobre las cuestiones relativas a la disponibilidad de datos y servicios climatológicos y el acceso a los mismos.

La Comisión promueve una serie de entidades nacionales, regionales y mundiales que se ocupan de asuntos relacionados con el clima y se apoya en ellas. Aparte de los SMHN, estas entidades incluyen otros organismos de las Naciones Unidas como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Mundial del Turismo (OMT), el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). La Comisión de Climatología también colabora ampliamente con organizaciones no gubernamentales como la Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja (IFRC), el Consejo Internacional de Ciencias (CIC, anteriormente Consejo Internacional para la Ciencia (CIUC)), instituciones de investigación, universidades, asociaciones profesionales y organismos de desarrollo como el Banco Mundial.

## 2. PROGRAMA MUNDIAL SOBRE EL CLIMA

En el decenio de 1970, se puso de manifiesto la necesidad de establecer una mayor coordinación y colaboración internacionales para colmar las lagunas relativas a la comprensión del clima y determinar la manera de hacer frente a una serie de influencias, tanto positivas como negativas, del clima en la sociedad y en el medio ambiente. En 1974, el Consejo Ejecutivo de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) acordó que esta debería iniciar un programa internacional sobre el clima y sentó las bases del Programa Mundial sobre el Clima. En 1978, el Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas solicitó a la OMM que prestara especial atención a los aspectos del Programa que pudieran ayudar rápida y eficazmente a las instancias decisorias y de planificación a nivel nacional para establecer programas y actividades sociales y económicos en sus respectivos países.

La Primera Conferencia Mundial sobre el Clima, celebrada en febrero de 1979, reconoció que el problema de la posible influencia humana en el clima revestía especial importancia. En la Declaración de la Conferencia se hizo hincapié en la necesidad urgente de que "los países de todo el mundo a) aprovecharan plenamente los conocimientos vigentes del hombre sobre el clima; b) adoptaran medidas para mejorar significativamente ese conocimiento, y c) previnieran posibles cambios de origen humano en el clima que podrían perjudicar al bienestar de la humanidad".

El Octavo Congreso Meteorológico Mundial estableció oficialmente el Programa Mundial sobre el Clima en 1979, reconociendo que para respaldar el programa era necesario contar con la cooperación de muchos organismos de las Naciones Unidas y de otras organizaciones internacionales. La OMM asumió la responsabilidad de ejecutar la coordinación general del programa y de los datos y aplicaciones referentes al clima, mientras que el PNUMA asumió la responsabilidad de coordinar los estudios del impacto climático, y la OMM y el CIC acordaron llevar a cabo conjuntamente el programa de investigación climática. La estructura del Programa Mundial sobre el Clima y los asociados que colaboran con la OMM han evolucionado con el transcurso del tiempo.

El Programa Mundial sobre el Clima consta de cuatro componentes. El Programa Mundial de Datos y Vigilancia del Clima (PMDVC) facilita la recopilación y gestión eficaces de datos climáticos y la vigilancia del sistema climático mundial, incluida la detección de la variabilidad del clima y el cambio climático. El Programa Mundial de Aplicaciones y Servicios Climáticos (PMASC) fomenta una comprensión científica más cabal del papel que desempeña el clima en las actividades humanas, la aplicación eficaz de la información y los conocimientos científicos para beneficio de la sociedad, servicios climáticos adaptados a los usuarios de diversos sectores socioeconómicos y la predicción de variaciones climáticas significativas (tanto naturales como derivadas de la actividad humana). El proyecto de los Servicios de Información y Predicción del Clima (CLIPS) fue establecido por la OMM como un mecanismo de ejecución del PMASC. El Programa Mundial de Evaluación del Impacto del Clima y Estrategias de Respuesta (PMEICER), ejecutado por el PNUMA, evalúa las repercusiones de la variabilidad y los cambios del clima que pueden afectar notablemente a las actividades económicas o sociales y asesora a los gobiernos al respecto; también contribuye a elaborar una serie de estrategias de respuesta socioeconómicas que pueden utilizar los gobiernos y las comunidades. El Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC), copatrocinado por la OMM, el CIC y la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO, tiene por objeto fomentar una mejor comprensión científica básica de los procesos climáticos para determinar la predictibilidad del clima, la variabilidad del clima y el cambio climático y el grado de influencia humana en el clima, y para desarrollar capacidad en materia de predicción climática. Las actividades y los proyectos del PMIC abarcan estudios de los procesos dinámicos y termodinámicos de la atmósfera terrestre, las interacciones de la atmósfera con la superficie terrestre y el ciclo hidrológico global; la variabilidad y predictibilidad del clima; la interacción de los procesos dinámicos, radiativos y químicos; las interacciones entre la criosfera y el resto del sistema climático, y las interacciones biogeoquímicas y físicas entre el océano y la atmósfera.

En la Segunda Conferencia Mundial sobre el Clima, celebrada en 1990, se reconoció la necesidad urgente de adquirir información completa sobre las propiedades y la evolución del sistema climático terrestre, detectar el cambio climático, respaldar el uso de las aplicaciones

climatológicas para el desarrollo económico y desarrollar la climatología y las predicciones climáticas. En 1991, el Undécimo Congreso Meteorológico Mundial decidió que debía establecerse un sistema mundial de observación del clima. El sistema sentaría sus bases en la coordinación y colaboración de los programas de investigación y operativos ya existentes o planificados para observar el medio ambiente mundial y seguiría desarrollando los programas necesarios para garantizar la continuidad de la información durante decenios.

En 1992, se estableció oficialmente el Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC) en virtud de un memorando de entendimiento entre la OMM, la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO, el PNUMA y el CIUC (actualmente, el CIC). Aunque el SMOC no haga observaciones ni genere productos de datos directamente, colabora estrechamente con sistemas de observación existentes o en proceso de desarrollo y los toma como punto de partida, y ofrece un marco para integrar los sistemas de los países y organizaciones partícipes. Los sistemas y redes que lo integran son:

- la Red de Observación en Superficie del SMOC (ROSS) y Red de Observación en Altitud del SMOC (ROAS) (subconjuntos del Sistema Mundial de Observación de la Vigilancia Meteorológica Mundial de la OMM);
- la Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de la OMM;
- la Red de referencia para la medición de radiaciones en superficie del Experimento Mundial sobre la Energía y el Ciclo Hídrico (GEWEX) del PMIC;
- el Sistema Mundial de Observación de los Océanos (SMOO), incluidos los sistemas de observación oceánicos como el Sistema Mundial de Observación del Nivel del Mar;
- el Sistema Mundial de Observación Terrestre (SMOT), incluidas la Red terrestre mundial - Glaciares y la Red terrestre mundial - Permafrost, y
- el Sistema Mundial de Observación del Ciclo Hidrológico (WHYCOS).

En la primera Cumbre de Observación de la Tierra, celebrada en 2003, se planteó el concepto de observaciones terrestres coordinadas y completas. En la tercera Cumbre, que tuvo lugar en 2005, se estableció oficialmente el Sistema de Sistemas de Observación Global de la Tierra (GEOSS) con el fin aprovechar los sistemas de observación nacionales, regionales e internacionales existentes y añadirles valor, coordinando esfuerzos, colmando lagunas importantes, respaldando la interoperabilidad, compartiendo información, fomentando una interpretación común de las necesidades de los usuarios y mejorando la difusión de información a los usuarios. El Sistema de Sistemas de Observación Global de la Tierra respalda al SMOC mediante la ampliación de la gama de variables relacionadas con el clima determinadas en el Plan de ejecución del SMOC y la colaboración con las partes para que cumplan con sus obligaciones conforme a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (véase el punto 4 más abajo).

La Tercera Conferencia Mundial sobre el Clima, celebrada en 2009, fue organizada por la OMM en colaboración con la UNESCO, el PNUMA, la FAO, el CIUC (actualmente, el CIC) y otros asociados intergubernamentales y no gubernamentales. El tema de la Conferencia fue “Predicción e información del clima para la adopción de decisiones” y su visión, establecer “un marco internacional para los servicios climáticos que vincule la información y la predicción del clima basadas en conocimientos científicos con la gestión de los riesgos y las oportunidades relacionados con el clima, en apoyo de la adaptación a la variabilidad del clima y el cambio climático, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo”. Esta Conferencia brindó a los países la oportunidad de analizar conjuntamente un Marco Mundial para los Servicios Climáticos (MMSC) adecuado durante los decenios posteriores, con miras a garantizar que cada país y cada sector de la sociedad sensible al clima cuente con los medios adecuados para acceder a la gama cada vez más amplia de servicios de información y predicción del clima y para poder aplicar estos servicios, que están disponibles gracias a los nuevos adelantos científicos y tecnológicos sobre el clima a nivel internacional.

### 3. PROGRAMA SOBRE EL CLIMA

A comienzos del decenio de 1990, la colaboración cada vez más estrecha que se fue estableciendo entre los programas relativos al clima de varias organizaciones internacionales desembocó en el establecimiento del Comité de Coordinación para el Programa Mundial sobre el Clima por parte de la OMM. En 1995, se publicó un proyecto de documento interinstitucional titulado *The Climate Agenda - International Climate-related Programmes: A Proposal for an Integrating Framework* (Acción para el Clima. Programas internacionales relacionados con el clima: propuesta de un marco de integración). Los cuatro ejes principales de esta propuesta eran: nuevos horizontes relativos a la climatología y la predicción climática; servicios climáticos para el desarrollo sostenible; observaciones especializadas del sistema climático, y evaluaciones del impacto del clima y estrategias de respuesta para reducir la vulnerabilidad. Los organismos impulsores de estos ejes fueron la OMM, la FAO y el PNUMA.

En 1995, el Duodécimo Congreso Meteorológico Mundial dio su aprobación al Programa sobre el Clima y estableció un Comité interorganismos sobre la Acción para el Clima. Si bien, en un principio, el Comité se encargó de ofrecer cierta orientación, la rapidez de los acontecimientos relacionados con el clima llevó a la OMM a valorar, durante la 53ª reunión de su Consejo Ejecutivo (2001), nuevos mecanismos para coordinar los asuntos climáticos. Así pues, en 2009, en su 61ª reunión, el Consejo Ejecutivo de la OMM acordó no renovar las actividades del Comité interorganismos sobre la Acción para el Clima y adoptar, en cambio, la iniciativa "Unidos en la Acción" de las Naciones Unidas para coordinar las cuestiones climáticas en el ámbito de las Naciones Unidas.

### 4. PROGRAMAS INTERNACIONALES SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

En la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima, celebrada en 1979, la comunidad climática internacional expresó su preocupación por "la posibilidad de que la expansión continua de las actividades humanas en la Tierra causara cambios climáticos importantes y persistentes a nivel regional e incluso mundial", e instó a que se estableciera una cooperación mundial para "investigar la posible evolución del clima mundial en el futuro y tener en cuenta los nuevos conocimientos así adquiridos para planificar el desarrollo futuro de la sociedad humana". En una conferencia sobre el clima celebrada en Villach (Austria) en 1985, científicos de 29 países desarrollados y en desarrollo concluyeron que era de esperar que las concentraciones crecientes de gases de efecto invernadero provocaran un calentamiento significativo del clima mundial durante el siglo siguiente, como se indica en la publicación *Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts* (WMO-No. 661) (véase *Working Group III – Impact on climate change, Impact of greenhouse gases on climate*, págs. 56–57). Asimismo, observaron que los datos sobre el clima del pasado tal vez no eran fiables para guiar los proyectos a largo plazo debido al calentamiento del clima mundial esperado, que el cambio climático y el aumento del nivel del mar estaban estrechamente vinculados con otros problemas medioambientales importantes, que cierto nivel de calentamiento parecía inevitable debido a actividades precedentes, y que el ritmo y el grado futuros de calentamiento podrían verse profundamente afectados por las políticas relativas a las emisiones de gases de efecto invernadero. En respuesta a estas preocupaciones, el PNUMA, la OMM y el CIUC (actualmente, CIC) establecieron en 1986 el Grupo consultivo sobre gases de efecto invernadero para proceder a evaluaciones periódicas del estado del conocimiento científico sobre el cambio climático y sus repercusiones.

En 1987, el Décimo Congreso Meteorológico Mundial reconoció que era necesario disponer de evaluaciones científicas objetivas, equilibradas y coordinadas a nivel internacional sobre el conocimiento de los efectos de las concentraciones crecientes de gases de efecto invernadero en el clima de la Tierra y la manera en que estos cambios podían influir en los modelos sociales y económicos. El PNUMA y la OMM acordaron crear un mecanismo intergubernamental que efectuara evaluaciones científicas del cambio climático y, en 1988, el Consejo Ejecutivo de la OMM, con el apoyo del PNUMA, estableció el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para que examinara la necesidad de:



- determinar las incertidumbres y las lagunas en los conocimientos actuales sobre el cambio climático y sus posibles repercusiones y elaborar un plan de medidas a corto plazo para colmar dichas lagunas;
- determinar la información necesaria para evaluar las consecuencias del cambio climático en materia de políticas y las estrategias de respuesta;
- examinar las políticas actuales y previstas a nivel nacional e internacional en relación con los gases de efecto invernadero, y
- hacer evaluaciones científicas y medioambientales de todos los aspectos relativos a los gases de efecto invernadero y difundir esta y otra información pertinente a los gobiernos y las organizaciones intergubernamentales, de modo que dichas evaluaciones se puedan tener en cuenta en las políticas relativas al desarrollo social y económico y en programas sobre el medio ambiente.

En noviembre de 1988, el IPCC estableció grupos de trabajo para que prepararan informes de evaluación sobre la información científica disponible en relación con el cambio climático (Grupo de Trabajo I), sobre las repercusiones medioambientales, sociales y económicas del cambio climático (Grupo de Trabajo II), y sobre la elaboración de estrategias de respuesta (Grupo de Trabajo III). En 1988, en su cuadragésimo tercer período de sesiones, la Asamblea General de las Naciones Unidas dio su aprobación a la iniciativa de la OMM y el PNUMA de establecer el IPCC y solicitó:

"un examen amplio y recomendaciones respecto de: a) el estado de los conocimientos en materia de climatología y cambios climáticos; b) los programas y estudios sobre las repercusiones sociales y económicas de los cambios climáticos, incluido el recalentamiento del planeta; y c) las posibles estrategias de respuesta con miras a demorar, limitar o mitigar las repercusiones de los cambios climáticos perjudiciales".

El IPCC adoptó su primer informe de evaluación el 30 de agosto de 1990. Sus conclusiones, junto con los resultados de la Segunda Conferencia Mundial sobre el Clima, que se celebró el mismo año, impulsaron a los gobiernos a establecer la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en marzo de 1994. El IPCC concluyó su segundo informe de evaluación a finales de 1995, el tercero en 2001, el cuarto en 2007 y el quinto en 2014. A menudo, los informes que publica el IPCC se utilizan para fundamentar las decisiones que se adoptan en virtud de la Convención Marco. También desempeñaron un papel primordial en las negociaciones que desembocaron en el Protocolo de Kyoto, tratado internacional en vigencia desde febrero de 2005 que toma como punto de partida la Convención Marco y establece objetivos jurídicamente vinculantes y un calendario para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de los países industrializados. Los informes del IPCC, como fuente de la mejor información científica disponible, sirven de guía para la aplicación del Acuerdo de París. Este Acuerdo, que se basa en los resultados científicos del quinto informe de evaluación del IPCC, fue un logro fundamental de la Conferencia de las Partes en su 21<sup>er</sup> período de sesiones, de 2015. Su objetivo es lograr que el aumento de la temperatura mundial no supere los 2 °C, y tratar de mantenerlo en 1,5 °C. Los informes de evaluación del IPCC, basados en el trabajo de cientos de científicos de todo el mundo, permiten a las instancias normativas de todos los niveles de gobierno adoptar decisiones sólidas basadas en datos empíricos. La concesión del Premio Nobel de la Paz de 2007 al IPCC, junto con el señor Al Gore, exvicepresidente de Estados Unidos de América, es testimonio del éxito notable de la labor del IPCC de informar a las instancias normativas, así como al público en general, de los fundamentos científicos en los que se apoya la cuestión del cambio climático.

## REFERENCIAS

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2014: *The Fifth Assessment Report (AR5)*, <https://ipcc.ch/report/ar5>.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2017: Acuerdo de París, [http://unfccc.int/paris\\_agreement/items/9485.php](http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php).
- Organización Meteorológica Mundial, 1986: *Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts* (Villach, Austria, 9 a 15 de octubre de 1985) (WMO-No. 661). Ginebra.

## LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- Grupo de observación de la Tierra (GEO), 2005: *Global Earth Observation System of Systems (GEOSS): 10-year Implementation Plan*. Documento de referencia GEO 1000R/ESA SP-1284. Noordwijk, División de Publicaciones de la Agencia Espacial Europea, ESTEC.
- , 2007: *GEO 2007–2009 Work Plan. Toward Convergence*. Ginebra.
- Junta de los Jefes Ejecutivos del Sistema de las Naciones Unidas para la Coordinación, 2008: *Las Naciones Unidas y el cambio climático: unidos en la acción*. Nueva York.
- Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, 2009: *The World Climate Research Programme Achievements: Scientific Knowledge for Climate Adaptation, Mitigation and Risk Management* (WMO/TD-No. 1499). Ginebra.
- , 2009: *WCRP Implementation Plan 2010-2015* (WMO/TD-No. 1503). Ginebra.
- , 2013: *The World Climate Research Programme Accomplishment Report*, [https://www.wcrp-climate.org/images/documents/reports\\_flyers/WCRP\\_report03\\_2012.pdf](https://www.wcrp-climate.org/images/documents/reports_flyers/WCRP_report03_2012.pdf).
-

Para más información, diríjase a:

## **Organización Meteorológica Mundial**

7 bis, avenue de la Paix – Case postale 2300 – CH 1211 Genève 2 – Suiza

**Oficina de Comunicación y de Relaciones Públicas**

Tel.: +41 (0) 22 730 87 40/83 14 – Fax: +41 (0) 22 730 80 27

Correo electrónico: [cpa@wmo.int](mailto:cpa@wmo.int)

**[public.wmo.int](http://public.wmo.int)**