

Monografías sobre la conservación del
patrimonio ferrotraviario valenciano

Patrimonio ferrotraviario y cambio climático

María Teresa Doménech Carbó
Miguel F. Silva



Monografías sobre la conservación
del patrimonio ferroviario valenciano

PATRIMONIO FERROTRANVIARIO Y CAMBIO CLIMÁTICO

MARÍA TERESA DOMÉNECH CARBÓ
MIGUEL F. SILVA

*Institut Universitari de Restauració del Patrimoni
Universitat Politècnica de València*



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA



INSTITUTO DE
RESTAURACIÓN DEL
PATRIMONIO
INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSITAT
D'VALÈNCIA



GENERALITAT
VALENCIANA

Agradecimientos

La serie *Monografías sobre la conservación del patrimonio ferroviario valenciano* es una de las actividades de difusión planificadas en el proyecto I+D AICO/2021/095, financiado dentro del programa de subvenciones a grupos de investigación consolidados (CONSOLIDER) de la Consellería de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital de la Generalitat Valenciana.

Monografías sobre la conservación del patrimonio ferroviario valenciano

© María Teresa Doménech Carbó

Coordinación de la edición de la serie:

María Teresa Doménech Carbó

Institut Universitari de Restauració del Patrimoni

Universitat Politècnica de València

Fotografías: Archivo

Imagen de la portada: Antigua estación Bejis-Torás de la línea ferroviaria Valencia-Zaragoza.

Autora de la fotografía: María Teresa Doménech Carbó.

Diseño y maquetación: Jesús Bordera - TXTO Editorial

Edita: TXTO EDITORIAL

Avda. Daniel Gil, 16 - Entlo. · Tel.: 96 291 04 43 · 46870 ONTINYENT (Valencia)

ISBN obra completa: 978-84-128223-1-1

ISBN volumen 2: 978-84-128223-2-8

Depósito Legal: V-394-2024

Primera Edición: 2023

Reservados todos los derechos. Está prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio o procedimiento de esta publicación sin la autorización previa, por escrito del editor, excepto las citas en revistas, diarios o libros si se hace constar la procedencia.

Índice

Prólogo	9
Parte 1. Fundamentos del Cambio Climático	
1. El Cambio Climático.....	13
1.1. Cambio climático.....	14
1.2. Ciencia del cambio climático.....	21
1.3. Clasificación de los climas.....	25
1.4. Zonas climáticas.....	29
1.5. Fenómenos meteorológicos.....	30
1.6. Referencias.....	31
1.7. Bibliografía.....	33
2. Modelos Climáticos.....	35
2.1. Modelos climáticos.....	36
2.2. Tipos de modelos climáticos	44
2.3. Validación.....	51
2.4. Proyecciones climáticas.....	53
2.5. Referencias.....	63
2.6. Bibliografía.....	66
3. Regionalización de modelos climáticos.....	67
3.1. Regionalización de modelos climáticos	68
3.2. Programas europeos de modelado de climas regionales.....	72
3.3. Programa español de generación de proyecciones climáticas.....	74
3.4. Escenarios regionales de cambio climático para la península Ibérica.....	75
3.5. Referencias.....	78
3.6. Bibliografía.....	79
4. Adaptación al cambio climático.....	81
4.1. Adaptación al cambio climático.....	82
4.2. Marco global.....	87
4.3. Marco europeo.....	101
4.4. Marco nacional.....	103
4.5. Comunitat Valenciana.....	107
4.6. Referencias.....	110
4.7. Bibliografía.....	112
Parte 2. Cambio Climático y patrimonio ferroviario valenciano	
5. El clima de la Comunitat Valenciana.....	115
5.1. El clima en el suroeste de Europa.....	116
5.2. El clima de la península Ibérica en el pasado.....	117

5.3. El clima de la península Ibérica en el momento presente.....	119
5.4. La especificidad de la Comunitat Valenciana.....	124
5.5. Referencias.....	127
5.6. Bibliografía.....	128
6. Monitorización del deterioro.....	129
6.1. Agentes causantes del deterioro.....	130
6.2. La corrosión del hierro y el acero.....	145
6.3. Monitorización de los procesos de corrosión.....	151
6.4. Monitorización de la suciedad superficial.....	177
6.5. Umbrales operacionales.....	177
6.6. Referencias.....	180
6.7. Bibliografía.....	184
7. Modelización del deterioro.....	185
7.1. Efectos asociados a los agentes climáticos y la contaminación.....	186
7.2. Modelos teóricos de cinética de la corrosión atmosférica.....	186
7.3. Modelos específicos para los agentes climáticos y la contaminación.....	195
7.4. Modelo de dependencia de la velocidad de corrosión con los agentes medioambientales.....	203
7.5. Modelos de corrosión y cambio climático.....	204
7.6. Referencias.....	205
7.7. Bibliografía.....	207
Parte 3: Resultados obtenidos en el proyecto AICO2021/095	
8. El clima de la Comunitat Valenciana. Años 2021 y 2022.....	209
8.1. Metodología.....	209
8.2. Alcoi.....	215
8.3. Valencia.....	235
8.4. Villafranca del Cid.....	255
8.5. Estudio comparativo de las tres localizaciones.....	272
8.6. Referencias.....	275
8.7. Bibliografía.....	276
9. El clima de la Comunitat Valenciana. Series de tiempo.....	277
9.1. Metodología.....	277
9.2. Alcoi Pinoso.....	281
9.3. Valencia.....	293
9.4. Vilafranca del Cid.....	310
9.5. Estudio comparativo.....	321
9.6. Referencias.....	325
9.7. Bibliografía.....	325
10. Modelización de la corrosividad con el cambio climático.....	333
10.1. Modelo de corrosión atmosférica.....	328

10.2. Determinación del factor de cambio de la velocidad de corrosión del acero con el cambio climático.....	333
10.3. Proyecciones climáticas.....	341
10.4 Escenarios de emisión.....	342
10.5. Proyección de la corrosión del acero en Valencia	343
10.6. Mapas de corrosividad de la Comunitat Valenciana.....	345
10.7. Incertidumbre.....	356
10.8. Conclusiones.....	357
10.9. Referencias.....	358
10.10. Bibliografía.....	359

Prólogo

Este libro constituye el segundo volumen de la serie monográfica “Estudios acerca de la conservación del patrimonio ferroviario valenciano” que se ha elaborado en el marco del proyecto I+D AICO2021/095 adscrito al programa CONSOLIDER de la Generalitat Valenciana. Tras haber sentado en el primer volumen de la serie las bases conceptuales y metodológicas de la conservación de patrimonio ferroviario, este segundo volumen responde a la necesidad de proporcionar información actualizada acerca del cambio climático y de las implicaciones que este tiene en la gestión de patrimonio ferroviario.

El cambio climático es un fenómeno con repercusión a escala global en el más amplio sentido aplicable a este término. Los efectos adversos que está generando y que, presumiblemente, se incrementarán en el futuro, de mantenerse la actual coyuntura socioeconómica global, van a tener repercusión no solo en el medio natural sino también en el medio humano. El patrimonio cultural y natural, por tanto, no está exento de sufrir las consecuencias negativas del calentamiento global y la transformación del clima, por lo que se hace necesario actuar para prevenir o, cuanto menos, mitigar sus efectos negativos. Las instituciones públicas europeas, conscientes del problema, ya han elaborado planes de adaptación que se basan en tres puntos fundamentales, evaluar el impacto del fenómeno e implementar programas de actuaciones para adaptar y mitigar sus efectos. Estos programas están principalmente planteados para centrar las actuaciones previstas en los medios (naturales y humanos) más vulnerables.

Por sus particulares características, el patrimonio ferroviario es muy sensible a sufrir los efectos adversos del cambio climático. La gran cantidad de objetos no declarados de interés patrimonial que se encuentra en estado de abandono o semiabandono en ambientes exteriores o en interiores mal acondicionados, el parque móvil o rodante hecho en acero y otros metales, especialmente sensibles a los agentes medioambientales y el gran tamaño de dichos objetos, que dificulta su almacenamiento y transporte, son algunos de los problemas que habrá que afrontar si se pretende preservar estos bienes para las futuras generaciones.

Para generar soluciones viables al problema del cambio climático es esencial conocer este fenómeno, ¿en qué consiste? ¿cómo ha surgido? ¿cómo se espera que evolucione? ¿qué causas naturales o antropogénicas están impulsando el fenómeno? ¿qué medidas

se están adoptando para hacerle frente? Son preguntas que obedecen al interés general por comprender el problema. Este volumen segundo se ha elaborado con el propósito de responder a esas cuestiones. En particular, la primera parte del libro “Fundamentos del Cambio Climático” se ha elaborado con ese propósito. En el capítulo primero se explican los conceptos básicos y los mecanismos físico-químicos que lo rigen desde una perspectiva divulgativa. Referirse al cambio climático supone tratar del clima, por este motivo en el capítulo segundo “Modelos Climáticos” se exponen aspectos esenciales de meteorología y climatología y se presentan las principales teorías de modelización del clima global que permiten efectuar predicciones sobre el comportamiento del clima en el futuro y estudiar el clima del pasado reciente y remoto. En el capítulo tercero “Regionalización de modelos climáticos” se profundiza en la modelización del clima y se describen los procesos de regionalización, sin los cuales sería imposible conocer el futuro impacto del cambio climático a escala regional, que es aquella a la que los gobiernos de las naciones o los gobiernos regionales tienen capacidad para actuar. Por último, el capítulo cuarto “Adaptación al cambio climático” se ocupa de describir los programas propuestos a nivel internacional, europeo, nacional y de la Comunitat Valenciana para hacer frente al desafío que supone el cambio climático.

La segunda parte del libro “Cambio Climático y patrimonio ferrotranviario valenciano” se aborda desde una perspectiva más específica tanto en lo geográfico como en lo relativo a las características del patrimonio ferrotranviario que lo hacen tan sensible a este fenómeno, su composición metálica en acero. El capítulo quinto “El clima de la Comunitat Valenciana” describe detalladamente las características de esta región que la hacen especialmente vulnerable al cambio climático. Se ha puesto especial énfasis en la descripción de las ocho variedades climáticas que se pueden encontrar a lo largo de la geografía valenciana. Los dos capítulos siguientes introducen al lector en la problemática que ocupa a los científicos del cambio climático, cómo evaluar los efectos negativos y cómo hacer previsiones para el futuro. En el capítulo sexto “Monitorización del deterioro” se describen los métodos instrumentales que existen hoy en día para examinar, analizar y evaluar objetos ferrotranviarios y mediante los que es posible monitorizar los efectos inducidos por el cambio climático. Esta parte del libro concluye con el capítulo séptimo “Modelización del deterioro”. En él se describen modelos físico-químicos teóricos que se han desarrollado para modelizar el proceso de corrosión del acero y que han sido adaptados al cambio climático.

El volumen segundo se ha concluido con una tercera parte titulada “Resultados obtenidos en el proyecto AICO2021/095”. Esta es la parte más novedosa ya que en ella se presentan los resultados inéditos de la investigación llevada a cabo en el proyecto I+D. Los capítulos octavo y noveno “Tendencias del clima de la Comunitat Valenciana” resumen los resultados obtenidos en el estudio del comportamiento en el pasado de las principales variables medioambientales, tanto climáticas como de calidad del aire, con incidencia sobre objetos de acero. A partir de datos suministrados por la Agencia Estatal de Meteorología y la Red Valenciana de Estaciones de Seguimiento y Control de la Calidad del Aire se ha podido efectuar una revisión de las series de tiempo que han determinado la evolución del clima en las últimas dos décadas, así como un estudio del comportamiento diario del clima en la Comunitat Valenciana en los últimos dos años. El capítulo décimo “Modelización de la corrosividad con el cambio climático”, es sin duda el

más importante, tanto por su originalidad como por el interés de su contenido. A partir de modelos teóricos de los mecanismos de corrosión en metales y, en particular en el acero, se ha diseñado un modelo original y único que, sirviéndose de datos obtenidos a partir de proyecciones climáticas y de escenarios futuros de emisión de gases de efecto invernadero, hace posible obtener una previsión de las condiciones climáticas específicas en años futuros y en diferentes escenarios de cambio climático. A partir de ese modelo se ha podido construir mapas de corrosividad del acero para la Comunitat Valenciana que se extienden hasta el año 2100.

Es de desear que esta segunda monografía, dirigida a los profesionales de la conservación de patrimonio, pero también a todos aquellos que de una forma u otra estudian y preservan bienes culturales ferroviarios, encuentren respuesta a muchos de los interrogantes que actualmente plantea el cambio climático y les sea de utilidad en la encomiable labor de salvaguardar estos bienes para las futuras generaciones.

María Teresa Doménech Carbó

Parte 1

Fundamentos del Cambio Climático

Capítulo 1: Ciencia del Cambio Climático

Contenidos

- 1.1. Cambio climático
 - 1.1.1. Definición
 - 1.1.2. Componentes del proceso de cambio climático
 - 1.1.3. Efecto invernadero
 - 1.1.4. Gases de efecto invernadero
 - 1.1.5. El calentamiento global
 - 1.1.6. Impacto del calentamiento global
- 1.2. Ciencia del cambio climático
 - 1.2.1. Climatología y meteorología
 - 1.2.2. Variabilidad climática
 - 1.2.3. La atmósfera y las variables meteorológicas
- 1.3. Clasificación de los climas
 - 1.3.1. Clasificación de la masa de aire de Bergeron
 - 1.3.2. Sistema de Clasificación Sinóptica Espacial
 - 1.3.3. Clasificación de Köppen-Geiger
 - 1.3.4. Clasificación de Thornthwaite
- 1.4. Zonas climáticas
- 1.5. Fenómenos meteorológicos
- 1.6. Referencias
- 1.7. Bibliografía

El cambio climático es un problema global que afecta a muchas actividades del sistema humano, pues este es responsable, en buena medida, de su rápido desarrollo en las últimas décadas. El patrimonio cultural, y muy especialmente el patrimonio ferrotraniario, puede verse afectado por este fenómeno en el futuro inmediato y, más seriamente, a largo plazo, si no son adoptadas las medidas adecuadas para su mitigación. En el presente capítulo se efectúa una revisión de los principales conceptos relacionados con el clima y el proceso de cambio climático.

1.1. Cambio climático

1.1.1. Definición

El **cambio climático** ha sido definido en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático como,

“... un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (Naciones Unidas, 1992).

Las modificaciones del patrón climático global a largo plazo pueden tener un origen natural, como sucedió en el pasado, durante los períodos glaciales, a causa de variaciones del ciclo solar. Sin embargo, el término “cambio climático” se aplica a las modificaciones observadas en el clima global terrestre desde el siglo XIX a consecuencia de las actividades humanas y muy en particular, a la emisión descontrolada de gases de efecto invernadero (GEI) como resultado del uso (combustión) de combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas) (Naciones Unidas, 2023).

Otra definición de interés que se establece en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Naciones Unidas, 1992) se refiere a los **efectos adversos del cambio climático** que define como,

“...los cambios en el medio ambiente físico o en la biota resultantes del cambio climático que tienen efectos nocivos significativos en la composición, la capacidad de recuperación o la productividad de los ecosistemas naturales o sujetos a ordenación, o en el funcionamiento de los sistemas socioeconómicos, o en la salud y el bienestar humanos”.

El Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) o Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático en su sexto informe de evaluación (AR6, por sus siglas en inglés) señala que el cambio climático y el calentamiento global que está experimentando la Tierra ya se ha manifestado en un incremento de 1,1 °C desde el periodo 1850-1900 al periodo 2011-2020,

“...[este incremento está] inequívocamente causado por la actividad humana y principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero...”(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023)

1.1.2. Componentes del proceso de cambio climático

Los expertos, cuando hacen alusión al cambio climático y al calentamiento global manifiestan que este fenómeno ya afecta al sistema climático terrestre. El **sistema climático** se define como *“...la totalidad de la atmósfera, la hidrosfera, la biosfera y la geosfera, y sus interacciones”* (Naciones Unidas, 1992). La figura 1.1 muestra los principales componentes del proceso de cambio climático que actúan en el sistema climático terrestre. Para comprender su complejo funcionamiento hay que entender que se trata de un sistema dinámico en el que interactúan múltiples fenómenos. Cada uno de estos impulsa al clima a cambiar en una determinada dirección. Por ejemplo, la erupción de un volcán produce una emisión de grandes nubes de ceniza volante que bloquean el paso de la radiación solar provocando una disminución de temperaturas. Ese enfriamiento constituye una perturbación en el clima como respuesta al impulso inducido por la erupción volcánica. En la evolución histórica del clima global, la radiación solar puede ser considerada el

agente impulsor o **factor de forzamiento**¹ primordial pues de él depende principalmente la temperatura de la Tierra y, por ende, su clima global.

Cada cambio inducido en el sistema climático puede generar un retorno que puede causar la intensificación (retorno positivo) o reversión (retorno negativo) del forzamiento (Watson *et al.*, 1995; Stocker *et al.*, 2013; World Meteorological Organization (WMO), 2017; US National Aeronautics and Space Administration, 2023).

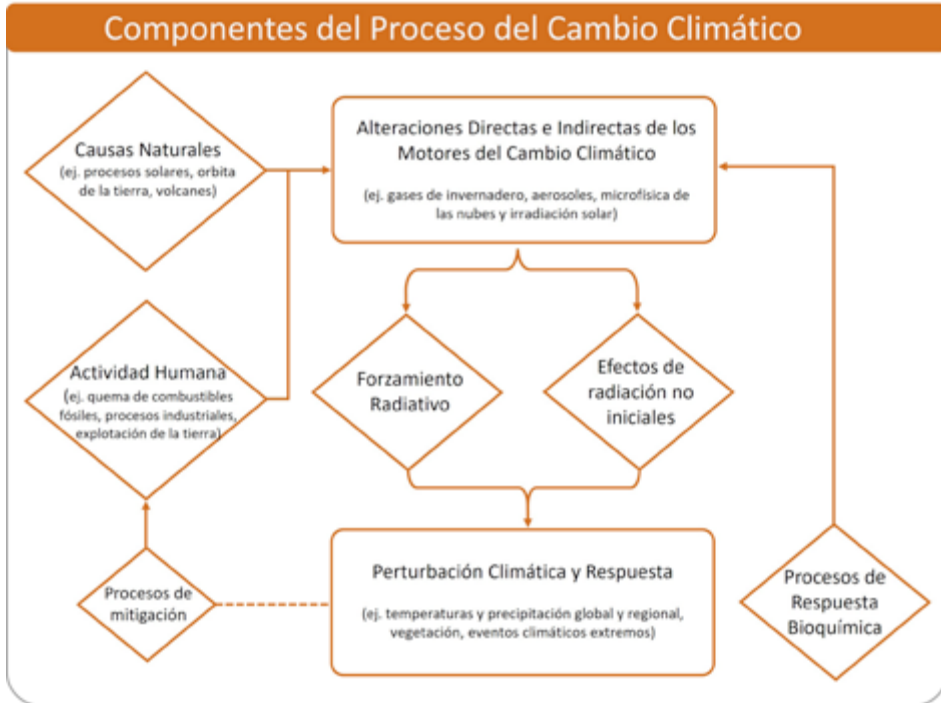


Figura 1.1. Componentes del proceso de cambio climático. Adaptado de Solomon *et al.* (2007).

1.1.3. Efecto invernadero

El efecto invernadero es un fenómeno natural por el cual la energía calorífica queda atrapada cerca de la superficie terrestre por ciertos gases presentes en la atmósfera denominados “gases de efecto invernadero”. El más conocido de ellos es el dióxido de carbono (CO_2). El efecto invernadero, es conseguido con una concentración media de CO_2 en la atmósfera de 280 ppm, y hace que la Tierra se mantenga con una temperatura promedio de 15°C , lo que la hace idónea para que se desarrollen en ella los seres vivos. Sin gases de efecto invernadero la superficie terrestre sería unos 33°C más fría y no podrían desarrollarse formas de vida, tal y como las conocemos.

El efecto invernadero se inicia con la radiación visible y ultravioleta procedente del Sol atravesando la atmósfera y llegando a los continentes y océanos. El agua de los océanos y los materiales que componen la superficie terrestre absorben esa radiación

¹ El forzamiento climático se define como “...*todo mecanismo o factor que genera cambios en la energía neta que entra en el sistema climático*” (Rodríguez Camino *et al.*, 2020).

y la transforman en energía térmica, lo que ocasiona un incremento de su temperatura. Parte de esa energía térmica es emitida en forma de radiación infrarroja que viaja por la atmósfera en sentido ascendente hacia el Espacio. Los gases de efecto invernadero están constituidos por moléculas que absorben parte de esa radiación infrarroja para modificar el modo en el que vibran. La figura 1.2 muestra el espectro de absorción en la región infrarroja media (4000-400 cm^{-1}) del aire en el que se reconocen las bandas de absorción de los diferentes gases de efecto invernadero. La energía absorbida por los GEI es re-irradiada a la superficie de la Tierra, de modo que la parte más baja de la atmósfera se mantiene, de manera estacionaria, con una temperatura lo suficientemente elevada para que el ser humano pueda vivir. Si en este proceso se introduce una modificación en el contenido de gases de efecto invernadero, el equilibrio se rompe produciéndose una disminución de temperatura, al disminuir la cantidad de gases, y un aumento de temperatura, si su concentración se incrementa.

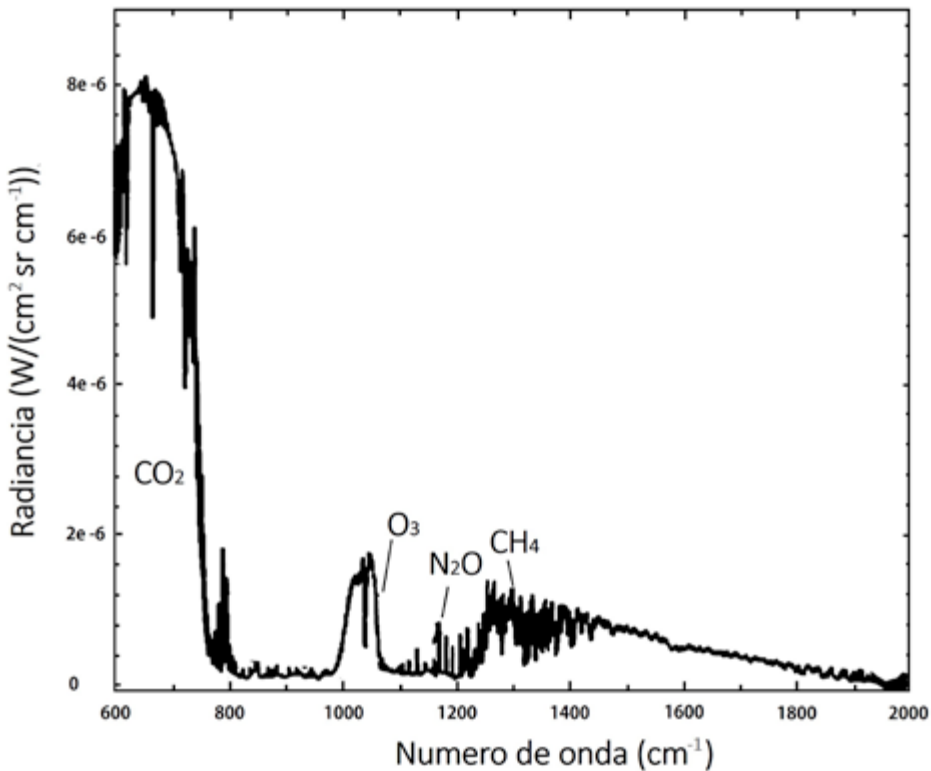


Figura 1.2. Espectro de absorción IR del aire mostrando las bandas de absorción de los principales GEI.

La figura 1.3 reproduce, en esquema, el mecanismo de producción del efecto invernadero. La energía solar que llega a la Tierra es del orden de 1368 W m^{-2} pero, debido a que gran parte de ella es reflejada en las capas superiores de la atmósfera, la cantidad de radiación que penetra en la atmósfera solo es de 342 W m^{-2} , en promedio anual. Una parte de esta energía es reflejada por las nubes (77 W m^{-2}) y por la superficie terrestre (30 W m^{-2})², y otra es absorbida por la atmósfera (67 W m^{-2}), lo que llevaría a una temperatura media de $0,19$

² En esta estimación se desprecia el efecto de albedo y otros efectos similares.

°C. Sin embargo, la acción del efecto invernadero, re-emitiendo a la superficie terrestre un promedio anual de 324 W m^2 , sitúa la temperatura media de la Tierra en 15 °C . El proceso energético se completa con la emisión al Espacio de 350 W m^2 , en su mayoría, en forma de radiación infrarroja (Farmer y Cook, 2013).

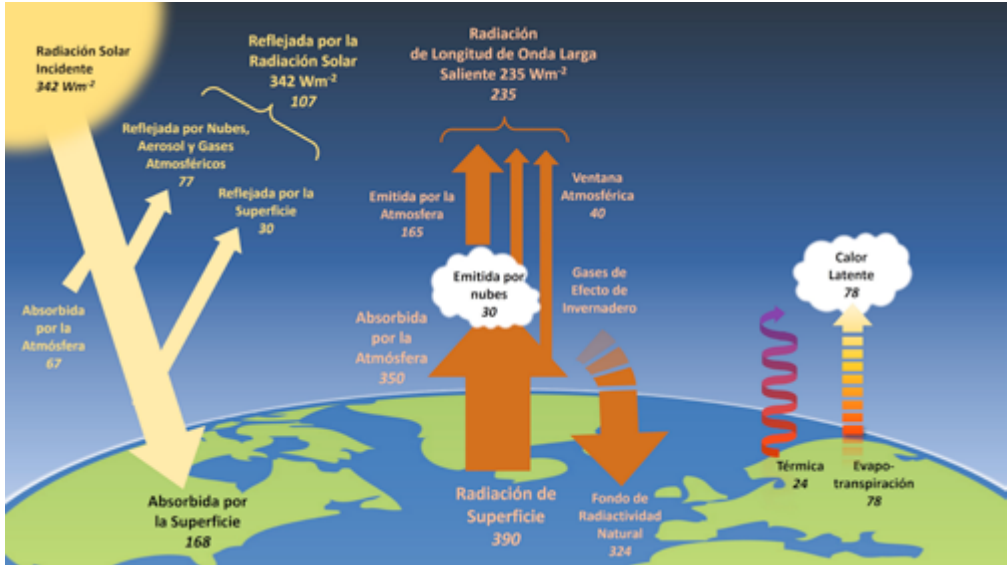


Figura 1.3. Esquema energético mostrando la producción del efecto invernadero. Adaptado de Solomon et al. (2007).

1.1.4. Gases de efecto invernadero

Los **gases de efecto invernadero** (GEI) fueron definidos en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) como,

“...aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y reemiten radiación infrarroja” (Naciones Unidas, 1992).

Otras definiciones de interés establecidas en la CMNUCC y relacionadas con la anterior son:

- **“Emisiones:** se entiende la liberación de gases de efecto invernadero o sus precursores en la atmósfera en un área y un período de tiempo especificados.
- **Depósito:** uno o más componentes del sistema climático en que está almacenado un gas de efecto invernadero o un precursor de un gas de efecto invernadero.
- **Sumidero:** cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero de la atmósfera.
- **Fuente:** se entiende cualquier proceso o actividad que libera un gas de invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de invernadero en la atmósfera”.

Entre las actividades que producen emisiones de GEI cabe citar la industria, el transporte, los edificios, la agricultura y el uso del suelo. En los dos últimos siglos, el incremento progresivo de estas actividades ha generado un incremento notable de las emisiones de

GEI que ha hecho que sus concentraciones se encuentren en el nivel más elevado desde hace dos millones de años. El exceso de GEI atrapa de manera anormalmente elevada el calor y lo reenvía a la superficie terrestre produciendo un aumento de temperatura (Tan, 2014).

El principal gas de efecto invernadero es el dióxido de carbono (CO_2) pero también se incluyen, metano (CH_4), óxido nitroso N_2O hidrofluorocarburos (HFCs), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6) y vapor de agua. Este último, presente en la atmósfera, responde física o químicamente a los cambios de temperatura mediante un proceso denominado retroalimentación.

Dióxido de carbono (CO_2)

Este gas es responsable de las tres cuartas partes de las emisiones, aproximadamente. Por este motivo es conocido como el termostato de la Tierra. Las emisiones de dióxido de carbono son producidas por la quema de combustibles fósiles, madera y otros materiales orgánicos y residuos sólidos. Este gas puede permanecer en la atmósfera durante miles de años. En 2019 la concentración de CO_2 fue de 400 ppm, alcanzando valores mayores que en los dos millones de años previos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023). En enero de 2023, el nivel medio mensual de dióxido de carbono superó las 419 partes por millón, lo que supone la cuarta lectura más alta desde 1958 (Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica, 2022).

Metano (CH_4)

Constituye aproximadamente el 16 % de las emisiones de GEI. Es el componente mayoritario del gas natural. Se libera en los vertederos como resultado de la descomposición de materia orgánica, en las industrias del gas natural y del petróleo, y en las prácticas agropecuarias, principalmente a partir de los sistemas digestivos de los animales de pastoreo. Permanece en la atmósfera algo más de una década y su efecto es casi cien veces superior al del CO_2 a lo largo de dos décadas. En 2019 la concentración de metano fue de 1866 ppm, alcanzando valores mayores que en los 800.000 de años previos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

Óxido nitroso (N_2O)

Supone el 6 % del total de las emisiones de GEI. Las principales actividades que ocasionan emisiones de este gas se originan en el sector agropecuario debido al uso de fertilizantes, producción de estiércol y la quema de residuos agrícolas. Los combustibles fósiles también contribuyen a las emisiones de este gas. Permanece activo durante dos décadas y su efecto es más de 250 veces más intenso que el del CO_2 . En 2019 la concentración de N_2O fue de 332 ppm, alcanzando valores mayores que en los 800.000 años previos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

Gases industriales

Representan el 2% de las emisiones. Entre ellos, cabe citar a ciertos gases fluorados tales como los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos, los clorofluorocarbonos, el hexafluoruro de azufre (SF_6) y el trifluoruro de nitrógeno (NF_3). Se generan con el uso de ciertos aerosoles, en refrigerantes, disolventes y como subproductos. Permanecen en la atmósfera cientos de miles de años y tienen un efecto miles de veces superior al del CO_2 . Otros GEI son el vapor de agua y el ozono troposférico³ (O_3).

³ No debe confundirse con la capa de ozono estratosférico.

1.1.5. El calentamiento global

El **calentamiento global** es entendido en climatología como el incremento a largo plazo de la temperatura atmosférica media del sistema climático terrestre a causa de la intensificación del efecto invernadero.

Además del efecto invernadero, hay otros fenómenos asociados a este que están contribuyendo al calentamiento global de la Tierra. Uno de estos fenómenos es la disminución del albedo de la Tierra. El albedo es un indicador de la capacidad reflectante de un cuerpo. Se define como el porcentaje de radiación reflejado por la superficie de un material respecto a la radiación que incide sobre él⁴. La disminución del albedo de la Tierra está causada por la reducción en el tamaño de los casquetes polares y glaciares debida al calentamiento global. El hielo de los casquetes polares posee un albedo de 0,5-0,7, lo cual contribuye a reflejar gran parte de la radiación solar que llega a la Tierra y reduce su calentamiento. Por el contrario, el agua de los océanos tiene un albedo mucho más bajo de 0,08, reflejando solo el 8 % de la radiación incidente y absorbiendo el 92 %, lo que contribuye al calentamiento del planeta. Al aumentar la superficie útil de los océanos en detrimento de los casquetes polares y glaciares se favorece el incremento en la velocidad de calentamiento global. Otro fenómeno que favorece el calentamiento global es la descongelación del permafrost⁵. Este suelo, al congelarse, retiene grandes cantidades de CO₂ y CH₄ que, al descongelarse, pasan a la atmósfera incrementando el contenido en GEI.

1.1.6. Impacto del calentamiento global

El impacto del cambio climático, tal como se refleja en los sucesivos informes de evaluación del IPCC y, en particular, en el AR6, se caracteriza por ser generalizado y sustancial, afectando al sistema climático y a la geodinámica terrestre y, por ende, a los sistemas naturales y humanos de la Tierra. El impacto del cambio climático se debe, principalmente, al calentamiento global y a los cambios en el patrón de precipitaciones, si bien está cobrando cierta importancia la acidificación del océano. Aunque los efectos adversos se hacen más evidentes en los sistemas naturales tales como los ecosistemas terrestres y marinos, la criosfera, los recursos hídricos y los sistemas costeros, cada vez afectan en mayor medida a los sistemas humanos.

Sistemas naturales:

El progresivo incremento global de la temperatura del planeta tiene un efecto directo en el sistema climático global.

Impacto sobre los recursos hídricos

La temperatura de la troposfera y de la capa de suelo más externa aumenta y la estratosfera se enfría, lo que afecta muy directamente a los recursos hídricos. También se produce una reducción de la criosfera, en particular, disminuye el tamaño de los casquetes

⁴ El albedo en el sistema terrestre es la capacidad de una superficie para reflejar la radiación solar. Una superficie con un albedo de 1,0 reflejaría el 100 % de la radiación incidente mientras que una superficie con un valor de albedo de 0,0 absorbería el 100 % de dicha radiación.

⁵ También llamado gelisuelo, permagel o permacongelamiento (*permafrost*). Es la capa de suelo que, en las regiones muy frías o periglaciares de la Tierra, permanece permanentemente congelado sin estar necesariamente recubierto de hielo o nieve.

polares y los glaciares. Asimismo, se reduce la capa de nieve, acumulada en invierno, y de permacongelado, lo cual conlleva un ascenso en el nivel de los mares y océanos y modifica la configuración de continentes y océanos. Estos efectos del calentamiento global ponen en riesgo áreas de naturaleza salvaje, poblaciones e infraestructuras costeras, pero también áreas interiores a los continentes por el efecto indirecto inducido en la geodinámica terrestre. Además, se han observado cambios en el ciclo hidrológico, reduciendo la disponibilidad y calidad del agua dulce (aumento de la eutrofización, disminución del oxígeno disuelto, incremento de la salinidad). El aumento de la temperatura incrementa la evaporación del agua de los océanos y cuencas hídricas y del suelo, con el consecuente incremento de la humedad en el aire. Se produce una precesión de la primavera y el verano que comienzan más tarde y se prolongan, acortando el otoño e invierno. Las noches se vuelven más cálidas con relación a los días. El aumento de temperatura, sobre todo, del agua de los océanos, que tiene una mayor inercia para enfriarse, tiene también un efecto en el sistema climático que favorece los fenómenos meteorológicos característicos del clima extremo, patrones de tormentas inusuales, tormentas más abundantes y frecuentes, que pueden alternar con ciclos más prolongados de sequías. Asimismo, provoca un aumento de la velocidad media global del viento y de fenómenos adversos como huracanes, ciclones, tifones, etc. El incremento en la intensidad y duración de fenómenos extremos como olas de calor y otros fenómenos habituales como las tormentas, provoca incendios e inundaciones de gran magnitud y numerosas pérdidas materiales y humanas (Houghton *et al.*, 2001; Houghton, 2004). Los ecosistemas mediterráneos son especialmente vulnerables debido al cambio en las precipitaciones, al aumento de las sequías y al mayor riesgo de incendios (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014).

Impacto sobre el medio ambiente

El incremento de temperatura en las distintas regiones del planeta cambia el clima, lo que tiene una gran repercusión en la flora y fauna de los diferentes ecosistemas terrestres que están en equilibrio en unas determinadas condiciones climáticas. Ciertas plantas endémicas de climas fríos no están preparadas para desarrollarse por encima de ciertos umbrales de temperatura y corren el riesgo de desaparecer. De manera similar, muchas especies zoológicas migran de sus hábitats habituales, a los que estaban bien adaptadas, a otras regiones a mayor latitud o altura provocando desequilibrios ecológicos como la aparición de especies invasoras que pueden producir la extinción de especies autóctonas. Las especies bien adaptadas a temperaturas más elevadas proliferarán generando desequilibrios en el ecosistema. El incremento de la velocidad del viento y las fuertes tormentas producen una grave erosión del terreno que, así, pierde la capa de cobertura fértil de suelo y provoca la desertización y la pérdida de cosechas. En los últimos cincuenta años, la temperatura de los océanos se ha venido incrementando en torno a 0,1 °C por década en la superficie de los océanos hasta una profundidad de 75 m y alrededor de 0,015 °C por década hasta los 700 m. El aumento de CO₂ en el agua ha reducido su pH en torno a 0,1 unidades durante el último siglo.

Todo esto, junto con los cambios en la salinidad, las corrientes, el incremento de la temperatura, del contenido en CO₂, de los nutrientes y de la luz y la reducción en el contenido de oxígeno, ha afectado a la composición, estructura y funcionamiento de los ecosistemas marinos. Se ha observado un desplazamiento de las áreas de distribución de zooplancton, peces, aves marinas e invertebrados bentónicos hacia los polos. Organismos

marinos, desde el fitoplancton a los predadores, han modificado su fenología, abundancia y distribución desplazándose hacia latitudes más altas y también han variado su distribución en profundidad. En el Mediterráneo se han producido eventos de mortalidad masiva, invasiones y propagación de nuevas especies de fauna de aguas cálidas.

Impacto sobre los sistemas humanos

A consecuencia de las alteraciones en los ecosistemas naturales, los cultivos y la producción de alimentos se están viendo afectados negativamente salvo en latitudes elevadas. Análogamente, la producción acuícola y las capturas pesqueras se están reduciendo con el consiguiente impacto negativo en el medio rural y pesquero que, por su mayor dependencia de los recursos naturales, los hace altamente vulnerables. Por consiguiente, la seguridad en el aprovisionamiento de alimentos y agua se ha visto reducida.

El aumento de la frecuencia e intensidad de fenómenos adversos y extremos tiene un impacto directo en la salud ya que ha incrementado la mortalidad y la morbilidad. Indirectamente, el incremento del contenido de los GEI en la atmósfera contribuye a aumentar el número de personas afectadas por enfermedades respiratorias causadas por el *smog* y los efectos nocivos directos de estos gases sobre el metabolismo humano. La migración de ciertas especies animales, portadoras de enfermedades, puede ser causa de aparición de nuevas enfermedades infecciosas en regiones donde estas no eran endémicas. También se producen brotes de enfermedades infecciosas estacionales más frecuentes y más tempranamente. Indirectamente, los cambios que se están produciendo en los sistemas sociales tales como la seguridad alimentaria, la capacidad laboral, la salud mental, el desplazamiento de la población o las lesiones por causa de fenómenos extremos, están afectando a la salud.

1.2. Ciencia del cambio climático

1.2.1. Climatología y meteorología

La **climatología** es una rama de las ciencias de la Tierra y de la geografía que estudia el comportamiento de los sistemas climáticos. La Guía de Prácticas Climatológicas de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) la define como (WMO, 2011):

“...la climatología consiste en el estudio del clima, sus variaciones y extremos y su influencia en varias actividades, sobre todo (aunque no exclusivamente) en los ámbitos de la salud, la seguridad y el bienestar humanos.”

A su vez, define el clima como:

“...las condiciones meteorológicas normales correspondientes a un lugar y a un período de tiempo determinados.”

El **sistema climático** es el conjunto de la atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera, integradas por aire, agua, hielo, permafrost, capa superior de la corteza terrestre y seres vivos. En el sistema climático estos cinco componentes participan en una serie de procesos o fenómenos interrelacionados entre sí tales como el ciclo del agua, los patrones de viento y corrientes oceánicas. El **clima**⁶ es la estimación promediada del

⁶ La *World Meteorological Organization* define el clima como el estado meteorológico promedio del planeta Tierra estimado en períodos superiores a 30 años.

comportamiento del sistema climático, entendiendo como promedio una sucesión de estados meteorológicos que se desarrollan en periodos de tiempo de cierta extensión que va desde meses hasta millares o millones de años, pero que, por lo general, se suele a calcular para periodos superiores a 30 años.

El comportamiento del sistema climático viene determinado por su variabilidad interna y por forzamientos radiativos externos tales como las oscilaciones de la intensidad de la radiación solar o las erupciones volcánicas de origen natural. También intervienen otras causas como el incremento del contenido en GEI de origen antropogénico, que tiene como efecto concomitante el cambio climático. El estudio del clima constituye el objeto de la **climatología**. Se trata de una ciencia multidisciplinar, ya que requiere disponer de conocimientos básicos de geografía, geología, biología, física, astronomía, oceanografía, química, matemáticas, ingeniería, así como nociones avanzadas de ciencia de la computación. La climatología estudia el comportamiento del sistema climático a escala planetaria que abarca todos los subsistemas del sistema Tierra y las interacciones entre ellos.

Cuando se reduce la escala del estudio al subsistema atmosférico, la variabilidad meteorológica disminuye porque el espectro de mecanismos que contribuyen al comportamiento caótico de la atmósfera se reduce y se entra en el dominio de la meteorología. Aunque utiliza los mismos parámetros, la **meteorología** estudia el comportamiento de los sistemas climáticos a escala atmosférica y de los fenómenos meteorológicos resultantes de su comportamiento. El propósito de esta ciencia es hacer previsiones a corto plazo. La diferencia entre meteorología y climatología radica en el rango de la escala temporal y espacial a considerar.

Como una rama de la climatología, la **ciencia del cambio climático** es una disciplina relativamente nueva que surge, en la década de 1980, con el propósito de describir los cambios observados en el comportamiento del sistema climático global con respecto a la tendencia seguida históricamente y hallar las causas y los efectos futuros de estos cambios (figura 1.4).

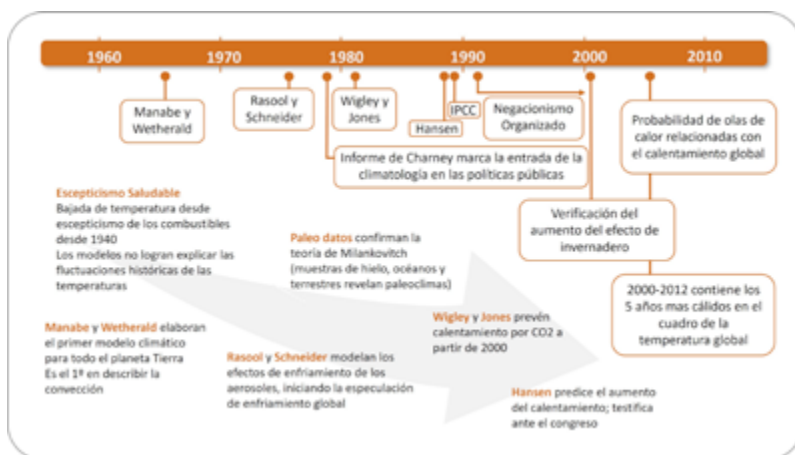


Figura 1.4. Esquema de la evolución histórica experimentada por la ciencia del cambio climático en las últimas décadas.

Como hito más reseñable de esta ciencia, desde su creación, cabe mencionar la constitución en 1988 del IPCC a partir de una resolución de la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) con el propósito de proporcionar a los gobiernos de las naciones datos científicos actualizados sobre la evolución del cambio climático y la evolución de las emisiones de GEI que permitiesen de dar una respuesta a esta amenaza en un contexto de cooperación global basada en el desarrollo sostenible y la eliminación de la pobreza (Naciones Unidas, 2015). Desde su creación, el IPCC ha elaborado seis informes de evaluación (*assessment report*, AR) el último, AR6 ha sido publicado en marzo de 2023 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

1.2.2. Variabilidad climática

Tanto el tiempo meteorológico como el clima se caracterizan por su variabilidad. Las múltiples desviaciones del comportamiento del sistema climático con respecto a su estado medio determinan la variabilidad climática. En función del agente causal pueden definirse tres tipos de variabilidad climática (Rodríguez Camino *et al.*, 2020): i) variaciones forzadas periódicamente como la diurna o la anual; ii) modos internos de variabilidad y iii) variaciones forzadas estocásticamente y asociadas a la naturaleza caótica del clima.

No debe confundirse la variabilidad del clima con el cambio climático. En el cambio climático se produce un cambio en el estado medio del sistema, y/o en la variabilidad de sus propiedades, que se mantiene durante largos periodos de tiempo. El cambio climático está asociado a modificaciones en el equilibrio energético del planeta por forzamientos internos o externos de origen natural o antropogénico.

1.2.3. La atmósfera y las variables meteorológicas

La atmósfera es la masa gaseosa que rodea la Tierra, la cual se mantiene como una capa que la envuelve por la acción de la atracción gravitatoria del propio planeta. La composición promedio del aire en gases componentes se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Composición química de la atmósfera terrestre.

Componente	Volumen (%)
N ₂	78,08
O ₂	20,95
Ar	0,93
CO ₂	0,03
Vapor de agua	1,00

La atmósfera varía con la altura tanto en composición como en densidad y temperatura. Atendiendo a esta última variable se distinguen las siguientes capas:

- **Troposfera:** Es la capa en contacto directo con la superficie terrestre que se extiende hasta los 10 km en los polos y hasta los 18 km en el Ecuador. En ella se desarrollan los fenómenos meteorológicos. La temperatura, aquí, disminuye progresivamente hasta los -70 °C.

- **Estratosfera:** sigue en altitud a la anterior alcanzando hasta los 50 km. La temperatura se incrementa hasta los $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta capa es conocida como “capa de ozono” porque en ella este gas alcanza la máxima concentración.
- **Mesosfera:** se extiende hasta los 80 km y la temperatura disminuye con la altura hasta los $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Termosfera:** es la capa más externa y se extiende hasta varios cientos de kilómetros. Los gases presentan una densidad muy baja y se encuentran ionizados, por lo que la temperatura alcanza los $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Las variables que habitualmente se utilizan para estudiar y describir los fenómenos meteorológicos se resumen en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Variables meteorológicas.

Variable	Unidades	Definición	Instrumento
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	Nivel térmico de un material. Relacionada termodinámicamente con la energía cinética de sus partículas	Termómetro
Presión atmosférica	N m^{-2}	La fuerza por unidad de superficie que ejerce el aire en la atmósfera sobre la superficie terrestre	Barómetro
Humedad	kg m^{-3} %	Cantidad absoluta (o relativa referida al valor de saturación a una determinada temperatura) de vapor de agua contenido por el aire	Higrómetro
Precipitación	L m^{-2}	Hidrometeoro que se producen en la atmósfera y se depositan en la superficie terrestre	Pluviómetro
Viento	m s^{-1}	El viento consiste en el movimiento de aire desde una zona hasta otra	Anemómetro Veleta (dirección)
Radiación social	W m^{-2}	Energía emitida por el Sol en forma de radiación electromagnética que llega a la Tierra	Radiómetro Piranómetro Heliógrafo (mide horas con insolación)

Las variables meteorológicas se miden y observan con instrumentos meteorológicos específicos instalados en estaciones meteorológicas fijas, situadas en numerosas localizaciones en la superficie terrestre, y en estaciones móviles, instaladas a bordo de barcos, aviones y satélites orbitales polares o geoestacionales⁷. Estos últimos están

⁷ Los satélites geoestacionarios giran a la vez que la Tierra, por lo que siempre están fijos en un punto situado sobre el Ecuador terrestre a unos 40.000 km. Proporcionan información simultánea de la mitad del planeta abarcando ambos hemisferios. Los satélites polares orbitan alrededor de la Tierra pasando por los polos a una distancia de la superficie entre 100 y 2000 km, lo que proporciona una mayor resolución espacial.

especializados en captar la radiación electromagnética en los rangos o “bandas” del espectro visible e infrarrojo mediante cámaras. Con las imágenes obtenidas a intervalos de tiempo regulares se componen secuencias que permiten observar el movimiento de las nubes. Las imágenes de la banda visible proporcionan información de las nubes ya que reflejan mucho más que el agua o el suelo la radiación solar. Las imágenes en el infrarrojo dan cuenta de la temperatura de las nubes. Las zonas brillantes corresponden a cuerpos fríos y las zonas oscuras a cuerpos calientes.

1.3. Clasificación de los climas

Los estudios modernos del comportamiento de los sistemas climáticos clasifican los climas de acuerdo a ciertos criterios:

- *Métodos genéricos*: basados en las causas que originan el clima. En este grupo están los métodos que clasifican el clima por el comportamiento de las masas de aire, la frecuencia relativa de aparición de diferentes tipos de masas o la localización de perturbaciones meteorológicas. Entre ellas la más ampliamente aceptada es la clasificación de Bergeron.
- *Métodos empíricos*: basados en los efectos causados por el clima. En este grupo están las clasificaciones basadas en zonas con determinados tipos de planta o evapotranspiración y el método de Köppen-Geiger que asocia determinados biomas con su propio clima.

El defecto que, en general, presentan estas clasificaciones es que las zonas climáticas tienen límites abruptos en lugar de transiciones progresivas de las propiedades de un clima a otro, tal como sucede en la naturaleza.

1.3.1. Clasificación de la masa de aire de Bergeron

Esta clasificación fue utilizada en la década de 1950. Discrimina los climas asignándoles tres letras para describir las propiedades de las masas de aire que los determinan tal como se resume en la figura 1.5.

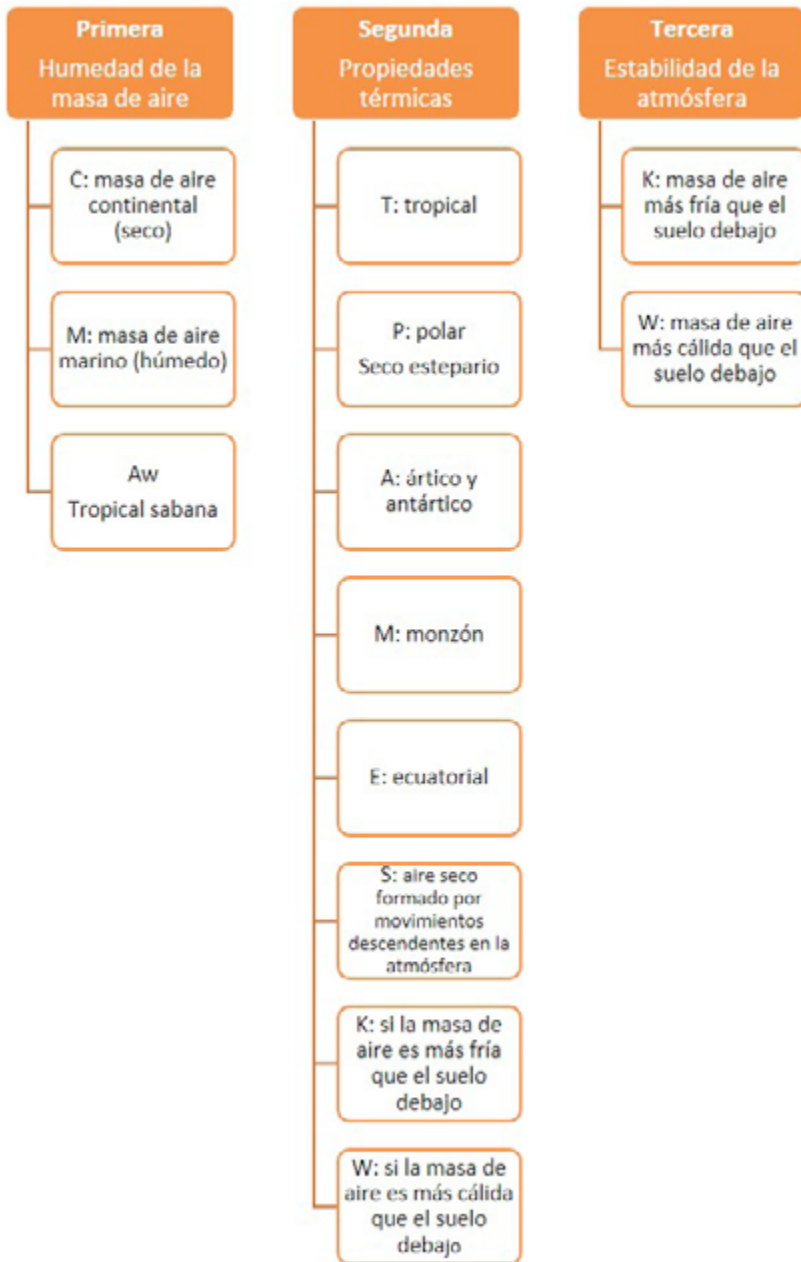


Figura 1.5. Clasificación de Bergeron.

1.3.2. Sistema de Clasificación Sinóptica Espacial

Basado en el esquema de Bergeron, la Clasificación Sinóptica Espacial (SSC, por sus siglas en inglés), comenzó a utilizarse en la década de 1970. Distingue seis categorías climáticas tal como muestra la figura 1.6:

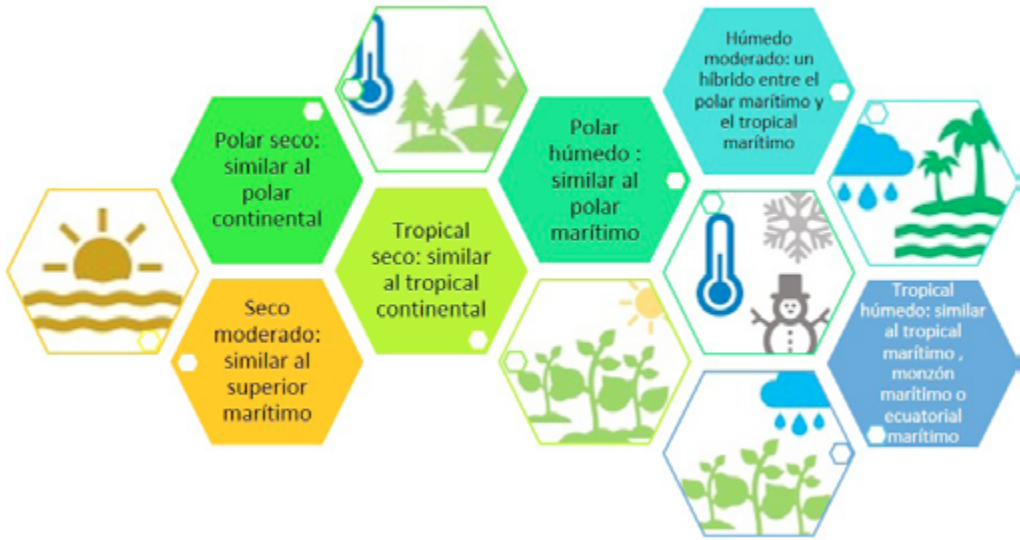


Figura 1.6. Clasificación SSC.

Polar seco (similar al polar continental), seco moderado (similar al superior marítimo), tropical seco (similar al tropical continental), polar húmedo (similar al polar marítimo), húmedo moderado (un híbrido entre el polar marítimo y el tropical marítimo) y tropical húmedo (similar al tropical marítimo, el monzón marítimo o el ecuatorial marítimo).

1.3.3. Clasificación de Köppen-Geiger

Esta clasificación se basa en los valores promedio mensuales de temperatura y precipitaciones. Establece cinco tipos primarios de clima que se identifican por una letra distintiva de la A a la E. Estos climas básicos, a su vez, se subdividen en otros secundarios tal como muestra el diagrama de la figura 1.7.

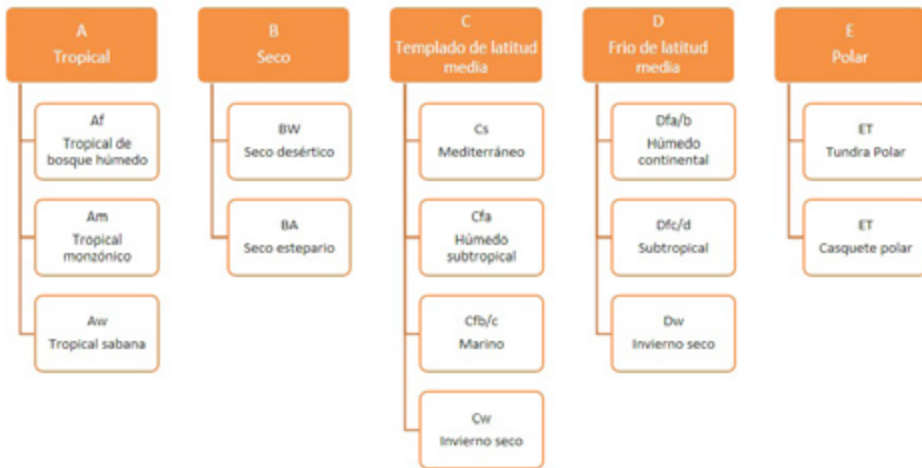


Figura 1.7. Esquema de la clasificación climática de Köppen-Geiger.

El grupo *A* de climas tropicales se caracteriza por altas temperaturas al nivel del mar y a poca altura, durante todo el año. La temperatura media es de 18 °C. Los climas del grupo *B* se caracterizan por ser secos, áridos y semiáridos. Las precipitaciones son escasas. El grupo *C* corresponde a climas templados con temperaturas promedio por encima de los 10 °C en los meses cálidos y una temperatura para los meses más fríos comprendida entre -3 y 18 °C. El grupo *D* reúne los climas continentales con temperaturas medias anuales de 10 °C en los meses cálidos y de 0 °C en el mes más frío. El grupo *E* de climas polares se caracteriza por tener temperaturas inferiores a los 10 °C durante todo el año. La figura 1.8. muestra la distribución de los diferentes climas de Köppen-Geiger en el atlas mundial.

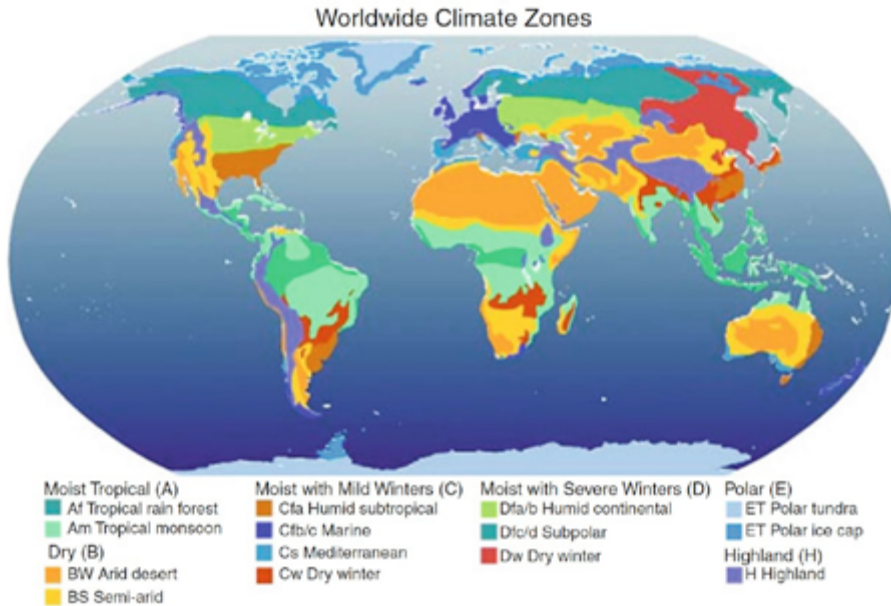


Figura 1.8. Atlas del mundo mostrando distribución de los diferentes climas de Köppen-Geiger en el atlas mundial. Elaborado por UCAR/NOAA, The COMET Program, Public Domain.

1.3.4. Clasificación de Thornthwaite

Este sofisticado sistema de clasificación se elabora a partir de los balances hídricos locales que se calculan con datos de humedad, en lugar de datos de precipitaciones, y con datos de temperatura. Para obtener los valores de humedad se monitoriza el balance de agua que recibe el suelo a través de la **evapotranspiración** ^(ET), definida a partir de la combinación de dos procesos, la evaporación desde el suelo, con y sin cubierta de plantas, y la transpiración de las plantas.

Este modelo contempla diversos índices que permiten cuantificar los componentes climáticos de un lugar: el índice global de humedad (MI, por sus siglas en inglés), la velocidad potencial de evapotranspiración (PE), el índice de eficiencia térmica (cociente de la temperatura y la evapotranspiración, (T/ET)), el índice de sequedad (porcentaje anual de tiempo en el que hay déficit de agua (DI, por sus siglas en inglés)), el índice de humedad (porcentaje anual de tiempo en el que hay excedente de agua, (HI, por sus

siglas en inglés)) y la evapotranspiración potencial (ETP, por sus siglas en inglés) definida como la evapotranspiración que tendría lugar si la humedad del suelo y la cobertura vegetal fueran óptimas. A partir de estos parámetros se elaboran unos descriptores que clasifican el clima del lugar tal como muestra la tabla 1.3. En este modelo se elaboran dos clasificaciones, en función de la humedad y en función de la eficacia térmica. En cada clasificación se establecen cinco diferentes tipos de clima (*A, B, C, D* y *E*) en función de la variación de la ETP en cada estación del año. Según esta clasificación, algunos de los tipos de clima presentan subtipos.

Tabla 1.3. Clasificación de Thornthwaite.

En función de la humedad				En función de la eficacia térmica			
Tipo de clima			Índice de humedad	Tipo de clima		ETP (cm)	
A	Hiperhúmedo		>100	A'	Megatérmico		>114
B	Húmedo	B ₄	80-100	B'	Mesotérmico	B' ₄	99,7-114
		B ₃	60-80			B' ₃	88,5-99,7
		B ₂	40-60			B' ₂	71,2-88,5
		B ₁	20-40			B' ₁	57-71,2
C	Subhúmedo seco	C ₂	0-20	C'	Microtérmico	C' ₂	42,7-57
		C ₁	-20-0			C' ₁	28,5-42,7
D	Semiárido		-40-(-20)	D'	Tundra		14,2-28,5
E	Árido		-60-(-40)	E'	Hielo		<14,2

1.4. Zonas climáticas

Una zona o región climática, de modo general, puede definirse como una porción de territorio que posee un clima predominante. Este clima característico está definido por el perfil de sus variables climáticas (temperatura, precipitaciones, vientos, vegetación, etc.). En España pueden identificamos seis zonas: oceánica, continental, mediterránea, de montaña y subtropical. La Comunitat Valenciana se encuentra en la zona climática de tipo mediterráneo como muestra la figura 1.9.

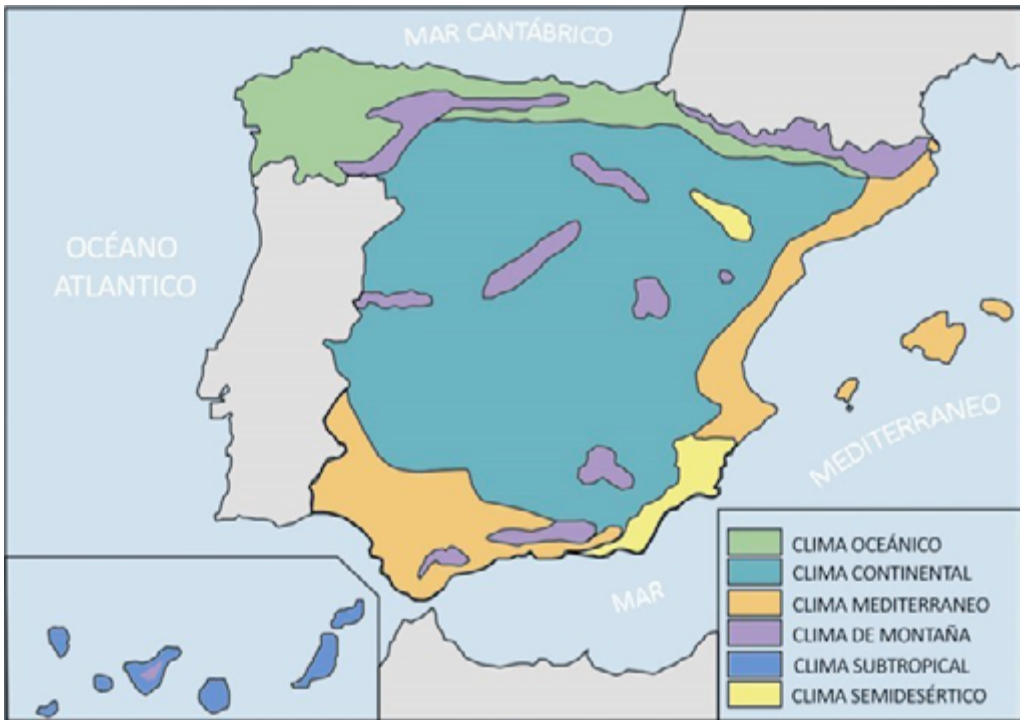


Figura 1.9. Zonas climáticas en la península ibérica, islas Canarias e islas Baleares.

1.5. Fenómenos meteorológicos

Se denomina **fenómeno meteorológico** a cualquier suceso o evento observable que se produce en la atmósfera terrestre de forma natural. En función de sus características se clasifican en ópticos, hídricos y atmosféricos. Se consideran **fenómenos meteorológicos normales** o comunes aquellos que se producen regularmente y no causan daños. Ejemplos de fenómenos comunes son las nubes, la lluvia, la nieve, la niebla, el viento o las tormentas (acompañadas de los rayos y los truenos).

Además de los anteriores, también pueden tener lugar fenómenos extremos y fenómenos adversos. Aunque coloquialmente pueden confundirse, estos términos describen situaciones diferentes desde el punto de vista meteorológico y climático.

Los **fenómenos singulares** o **extremos** son aquellos fenómenos meteorológicos caracterizados por ser (Gutiérrez Rubio *et al.*, n.d.):

- “Locales.
- Poco frecuentes.
- De intensidad significativa.
- Con capacidad para provocar alto impacto social”.

Los fenómenos extremos se producen muy pocas veces, o de forma rara, en un determinado lugar. Pese a su intensidad, estos fenómenos son difícilmente detectables

mediante instrumentación convencional. Esto es debido a la insuficiente resolución de los instrumentos a causa de la restringida área que abarcan estos fenómenos, por su carácter local, y al breve periodo de tiempo en que se producen. Ejemplos de fenómenos singulares son los tornados, trombas o mangas marinas, tolvaneras y tubas, reventones, granizadas, aludes y avalanchas, oleajes de rompiente, etc.

Los **fenómenos adversos** se caracterizan por tener un gran impacto negativo (para la salud, economía, el medioambiente, etc.) en el lugar donde se producen. Además, pueden tener lugar con cierta frecuencia (por ejemplo, las inundaciones en la Comunidad Valenciana por fuertes tormentas con abundantes precipitaciones).

1.6. Referencias

Farmer, G.T. y Cook J. (2013) *Climate Change Science: A Modern Synthesis, Vol. 1-The Physical Climate*. Springer.

Gutiérrez Rubio, D., Riesco Martín, J., Díez Muyo, E., Martín León, F., Núñez Mora, J.A., Sánchez-Laulhé Ollero, J.M. y Ferri Llorens, M. (n.d.) *Breve Guía Descriptiva de los fenómenos meteorológicos recogidos en el Sistema de Notificación de Observaciones Atmosféricas Singulares (SINOBAS)*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Agencias Estatal de Meteorología. Disponible en <http://aemet.es>. [Consultado 5-05-2023].

Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M. van der Linden, P.J., Dai X. Maskell, K. y Johnson, C.A. Eds. (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. Disponible en: <http://www.cambridge.org>. [Consultado 5-05-2023].

Houghton, J.T. (2004) *Global Warning. The Complete Briefing*, 3rd Ed. Cambridge: Cambridge University press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023.

Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. [Consultado 5-05-2023].

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014) *Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC grupo de trabajo II*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/guia-resumida-gt2-impactos-adaptacion-vulnerabilidad-ar5_tcm30-177778.pdf. [Consultado 23-04-023].

Naciones Unidas (1992) Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Disponible en: <https://unfccc.int/docs/convkp/convsp>. [Consultado 26-04-2023].

Naciones Unidas (2015) Agenda 2030 para el desarrollo sostenible. *Resolución de la Asamblea General de la ONU de 25 de septiembre de 2015*. Disponible en: <https://www.un.org>. [Consultado 26-04-2023].

Naciones Unidas (2023) ¿Qué es el cambio climático? Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>. [Consultado 30-04-2023].

Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (2022) Base de datos del Departamento de Comercio de los Estados Unidos. Disponible en: <https://www.noaa.gov/climate>. [Consultado 30-04-2022].

Rodríguez Camino, E., Parodi Perdomo, J.A., González Rouco, F. y Montoya Redondo, M. (2020) "Proyecciones climáticas". En: *Física del caos en la predicción meteorológica*, AEMET. Disponible en: https://www.aemet.es/es/conocerlas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/Fisica_del_caos_en_la_predicc_meteo. [Consultado 16-04-2023].

Solomon, S., Qin, Manning, D.M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., y Miller, H.L. Eds. (2007) *AR4 Climate change 2007: The physical science basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change, New York: Cambridge University Press.

Stocker, T.F. Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M.M.B., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. y Midgley, P.M. (2013) *Climate Change 2013. The Physical Science Basis Summary for Policymakers, Technical Summary and Frequently Asked Questions*. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf. [Consultado 17-04-2023].

Tan, Z. (2014) *Air Pollution and Greenhouse Gases From Basic Concepts to Engineering Applications for Air Emission Control*. Springer.

US National Aeronautics and Space Administration (2023) *Global Climate Change. Vital Signs of the Planet*. Disponible en: <https://climate.nasa.gov/faq/70/que-es-el-efecto-invernadero/>. [Consultado 12-04-2023].

Watson, R.T., Zinyowera, M.C. y Moss, R.H. Eds. (1995) *Climate Change 1995: The IPCC Second Assessment Report. Scientific-Technical Analyses of Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University press.

WMO (2011) *Guide to climatological practices third*. WMO. World Meteorological Organization. Disponible en: http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_en.pdf (citado en páginas 118, 119). [Consultado 30-04-2022].

WMO (2017) *Global Observing System Components*, WMOURL. Disponible en: <https://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Goscomponents.html>. [Consultado 30-04-2022].

1.7. Bibliografía

Asociación Española de Climatología (2014) Cambio Climático y Cambio Global. Serie A, 9, Madrid: Asociación Española de Climatología (AEC).

Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. y Maskell, K. Eds. (1996) *Climate change 1995: the science of climate change*. IPCC, Cambridge: Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>. [Consultado 5 mayo 2023].

Mann, M.E., Bradley, R.S. y Hughes, M.K. (1998) "Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries", *Nature* 392(6678), pp. 779–787.

Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M.M.B., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. Eds. (2013) *AR5. Climate Change 2013. The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: <http://ipcc.ch>. [Consultado 30-04-2022].

World Bank Group (2021) World Bank Climate Change Knowledge. Disponible en: <http://climateknowledgeportal.worldbank.org>. [Consultado 30-04-2022].

Capítulo 2:

Modelos climáticos

Contenidos

- 2.1. Modelos climáticos
 - 2.1.1. Componentes de los modelos
 - 2.1.2. Estructura procesual de los modelos
- 2.2. Tipos de modelos climáticos
 - 2.2.1. Modelos de cajas
 - 2.2.2. Modelos de balance de energía
 - 2.2.3. Modelos radiativo-convectivos
 - 2.2.4. Modelos estadístico-dinámicos
- 2.3. Validación
- 2.4. Proyecciones climáticas
 - 2.4.1. Fundamentos
 - 2.4.2. Escenarios
 - 2.4.3. Modelos climáticos y bases de datos
 - 2.4.4. Predecibilidad
 - 2.4.5. Incertidumbres
- 2.5. Referencias
- 2.6. Bibliografía

La predicción del comportamiento del sistema climático terrestre se basa en el desarrollo de modelos teóricos. Para que estos modelos sean eficaces deben incorporar el mayor número de factores que actúan sobre los distintos componentes del sistema, de modo que las interacciones entre ellos puedan ser descritas de la manera más precisa posible. Dicho reto puede ser abordado desde aproximaciones diversas, lo que ha dado lugar a diferentes tipos de modelos climáticos. Por otra parte, algunos de los factores que están determinando en mayor medida el curso del cambio climático son de origen antropogénico. Por tanto, la predicción del rumbo futuro del sistema climático dependerá

de cómo se desarrolle en el futuro la gobernabilidad de los países, la socioeconomía y la demografía, entre otros. Predecir esto implica establecer una serie de hipótesis que, según como sean planteadas, darán lugar a distintas situaciones o “escenarios” futuros para la humanidad. En este capítulo se revisan los fundamentos de los modelos climáticos y se explica el concepto de escenario de cambio climático. La combinación de ambos dará lugar a las proyecciones del clima en el futuro para los escenarios más probables de evolución de la humanidad.

2.1. Modelos climáticos

La ciencia del cambio climático se sustenta, en buena medida, en el desarrollo de modelos climáticos que permitan estudiar sus causas y efectos. Los **modelos climáticos** son descripciones matemáticas de los procesos físicos, químicos y biológicos que regulan las interacciones entre los componentes que conforman los sistemas climáticos. Se trata de modelos teóricos que describen los procesos naturales que configuran la dinámica interna de los sistemas climáticos mediante ecuaciones que simulan dichos procesos. Según la Verein Deutscher Ingenieure¹ (VDI, por sus siglas en alemán) (VDI, 2017a) los modelos climáticos se definen como:

“...representaciones físicas simplificadas de los procesos atmosféricos y sus relaciones...que cumplen los principios físicos fundamentales y que usan ecuaciones físicas fundamentales, aproximaciones, parametrizaciones y ciertas condiciones de contorno...los sistemas de ecuaciones de los modelos...son resueltos con la ayuda de métodos numéricos con condiciones iniciales y de contorno específicas” (VDI, 2017a).

De modo similar, el Panel Internacional para el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, de las siglas en inglés) define los modelos climáticos como (Amblar Frances *et al.*, 2017):

“...una representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de realimentación, y que recoge todas o algunas de sus propiedades conocidas”

Los modelos climáticos se utilizan para estudiar la dinámica de los sistemas climáticos actuales y del pasado y para conocer tendencias y efectuar predicciones² del clima futuro,

¹ VDI es una sociedad europea, fundada en Alemania, que reúne a más de 150.000 ingenieros y científicos cuyo objetivo principal es promover el avance científico.

² En relación al clima se utilizan los términos “predicción” (“El tiempo: predicción general” es la expresión que figura en la página principal de la web de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) <https://www.aemet.es/es/portada>, consultada el 12-04-2023) y “pronóstico”. El término “predicción” tiene un significado diferente según se utilice acompañando a una certeza (teoría determinista) o a una hipótesis con cierto grado de probabilidad (teoría probabilística). En estadística probabilística las predicciones son modelos basados en el estudio de datos históricos y patrones pasados y desempeñan un papel clave para prevenir o mitigar riesgos. Todo ello es coherente con el significado que figura en el Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua (RAE) “...anunciar por revelación, conocimiento fundado, intuición o conjetura algo que ha de suceder”. En meteorología la predicción posee un carácter estimativo asociado a que el modelo climático usado posee, inherente a sí mismo, un cierto grado de imprecisión en la descripción del comportamiento futuro del sistema. Por tanto, será necesario contrastar experimentalmente el modelo y efectuar los ajustes necesarios para que describa lo más exactamente posible el comportamiento real del sistema. En el lenguaje coloquial se utilizan frecuentemente las expresiones “pronóstico del tiempo” y “previsión del tiempo”. El término “pronóstico” tiene un sentido más genérico que alude a la formulación de un modelo sustentado teóricamente. En estadística predictiva un pronóstico es una estimación cuantitativa o cualitativa de uno o varios factores causales (variables) que conforman un evento futuro, basándose en datos del presente o del pasado. El término pronóstico se emplea en meteorología para referirse

en particular, los cambios originados de forma natural y por la acción humana. Los modelos climáticos usan métodos de investigación cuantitativa. Las simulaciones del clima que realizan son muy diversas, tanto en metodología como en complejidad, abarcando desde aquellas que pueden utilizarse en un ordenador personal hasta otras tan complicadas, desde el punto de vista matemático, que exigen el uso de potentes superordenadores.³ En meteorología y climatología se utiliza el término **programa** para referirse a la “... implementación de un modelo mediante un ordenador...” (VDI, 2017a).

Estos modelos permiten a los científicos hacer estimaciones futuras de la evolución del sistema climático considerando cambios en las condiciones, por ejemplo, para saber si la temperatura se incrementará cinco grados centígrados en una década o en una centuria. Por otra parte, estos modelos son de suma importancia para ensayar nuevas tecnologías antes de diseñar objetos reales como puentes, puertos o edificios, adecuándolas a las necesidades futuras.

Para elaborar los modelos climáticos, además de recurrir a las leyes fundamentales de la química, física, geología y biología, se estudian los datos climáticos reportados en el pasado, bien por consulta de inventarios históricos meteorológicos obtenidos por medición directa, o bien mediante indicadores proxy, por ejemplo, dendrocronología, cambios en el desarrollo de los corales, nivel del mar, circulación oceánica, volumen de hielo de los glaciares, etc. Los datos correspondientes a periodos de tiempo largos son procesados y analizados mediante modelos analíticos elaborados laboriosamente por grupos internacionales de científicos.

2.1.1. Componentes de los modelos

De acuerdo con Rose (n.d.), los modelos climáticos se elaboran combinando cuatro tipos de procesos principales que se interrelacionan en el sistema climático global.

- *Radiación*: se refiere al balance de energía asociado a la radiación que llega del Espacio, principalmente del Sol, y a la emisión de energía desde las diferentes partes del planeta, principalmente, radiación infrarroja.
- *Dinámica*: los diversos fluidos que circulan por el planeta, el aire de la atmósfera y el agua de mares y océanos, están en continuo movimiento del que resultan fenómenos tales como los vientos, que se desplazan de latitudes bajas a altas, y en vertical mediante corrientes de convección y, algunas veces, provocando turbulencias. En el fondo de los océanos, de modo similar, se desarrollan las corrientes oceánicas que se desplazan miles de kilómetros.
- *Procesos de superficie*: Se refiere a los procesos dinámicos en que interviene el hielo, la nieve o la vegetación. Todos ellos contribuyen al albedo y a la emisión de otros tipos de energía desde la superficie terrestre, así como a los intercambios de humedad.

a la predicción climática realizada para un cierto plazo de tiempo (mañana, la próxima semana). Con respecto a la expresión “previsión del tiempo”, también utilizada en el lenguaje coloquial, el Diccionario de la RAE define el término “prever” como “Conocer, conjeturar por algunas señales o indicios lo que ha de suceder”.

³ El Community Climate System Model (CCSM) elaborado por NCAR es tan complejo que exige tres trillones de cálculos matemáticos para simular un día del clima de la Tierra.

- *Procesos químicos y biológicos*: incluyen los procesos reactivos y de intercambio de materia que generan cambios en la composición química de la atmósfera. Los ciclos del carbono u otros elementos químicos que se intercambian entre la atmósfera, el océano y la corteza terrestre, constituyen buenos ejemplos. También se incluye aquí a todos los procesos biológicos que afectan al clima, como el metabolismo de seres vivos terrestres y marinos.

Los modelos climáticos se elaboran estableciendo una cierta escala temporal y espacial que determina su resolución. Dependiendo de la fidelidad con la que se simula cada uno de estos componentes y el número de componentes que se combinan, el modelo adquirirá una mayor o menor complejidad y resolución (tanto espacial como temporal).

2.1.2. Estructura procesual de los modelos

Los modelos climáticos son sistemas de ecuaciones diferenciales parametrizadas que se procesan y aplican convenientemente. El núcleo conceptual del modelo o **modelo físico**, lo conforman conjuntos de ecuaciones diferenciales denominadas ecuaciones de pronóstico. En estas ecuaciones se conjugan leyes químicas y físicas fundamentales, muy en particular, de dinámica de fluidos. Se trata de un conjunto de ecuaciones de Euler en condiciones de compresibilidad y sistema no hidrostático, formuladas para una serie de variables de pronóstico: densidad, vector velocidad y temperatura, preferentemente, pero también, presión o fuente de calor diabático⁴. Para desarrollarlas se aplican principios fundamentales de conservación de la energía, el momento, la masa (aire, agua, carbono, y otros elementos y sustancias relevantes, así como trazadores). Las ecuaciones de momento cinético, utilizadas para calcular velocidades, se basan en las leyes de Newton de la cinemática e incluyen los efectos del movimiento de rotación terrestre, como la fuerza de Coriolis. Las ecuaciones de temperatura se asientan en las leyes de la termodinámica. Las ecuaciones de Euler, que se obtienen a partir de las leyes generales de la física, son ampliadas incluyendo términos específicos para vapor de agua, concentración de agua en las nubes, contenido de hielo, lluvia y nieve o energía cinética de turbulencias. La figura 2.1. muestra un esquema con la estructura del proceso de elaboración de un modelo atmosférico sencillo utilizado en la previsión meteorológica (Theis y Baldauf, 2019).

La fase inicial de elaboración de un modelo climático se denomina “preproceso” y en ella se lleva a cabo el diseño conceptual, lo que exige realizar actividades de observación, establecimiento de condiciones auxiliares y asimilación de datos. Para la elaboración del modelo se requiere una serie de entradas o aportes (*inputs*) de los que los más importantes son las **condiciones auxiliares**, esto es, las condiciones iniciales y las condiciones de contorno⁵ de la atmósfera, que se fijarán a partir de las observaciones experimentales. Las condiciones iniciales, por ejemplo, temperatura, densidad, movimiento del aire en la atmósfera o del agua en el océano, se asignan, para un instante inicial prefijado, a partir de observaciones experimentales directas o indirectas. A partir de ahí, se calcula la evolución temporal de cada una de las variables resolviendo las ecuaciones diferenciales en los sucesivos instantes de tiempo y en los diferentes puntos del espacio

⁴ Una fuente diabática es aquella que está asociada a un proceso con intercambio de calor.

⁵ En dinámica de fluidos computacional las condiciones de contorno son el conjunto de restricciones de los problemas de valor límite. Entre otros incluyen condiciones de entrada, salida, pared, condiciones de presión constante, axisimétricas, simétricas y periódicas o cíclicas.

a escala planetaria. Como se verá más adelante, esto exige una discretización del tiempo y el espacio. Condiciones de contorno pueden ser el espesor de las capas atmosféricas a una determinada latitud y longitud, la composición en dióxido de carbono o metano o el periodo de tiempo en el que se estudia el clima, décadas, siglos, milenios o millones de años. La **asimilación** es el proceso de combinación de las observaciones con las predicciones del modelo. En la etapa de preproceso tiene lugar una primera asimilación para ajustar las ecuaciones formuladas a las condiciones reales.

Las ecuaciones del modelo son tan complejas que no tienen una solución única y simple, por lo que deben ser sometidas a tratamientos de cálculo y parametrización. Esta segunda fase de la elaboración del modelo se denomina “procesado del modelo”. En el procesado las ecuaciones de pronóstico son sometidas a un modelo de cálculo numérico, el **núcleo dinámico**. Este modelo de cálculo numérico permite resolver las ecuaciones diferenciales. El núcleo dinámico se sustenta en un sistema informático que efectúa simulaciones, mediante cálculo numérico, de las cuales se obtiene una solución aproximada para las ecuaciones.

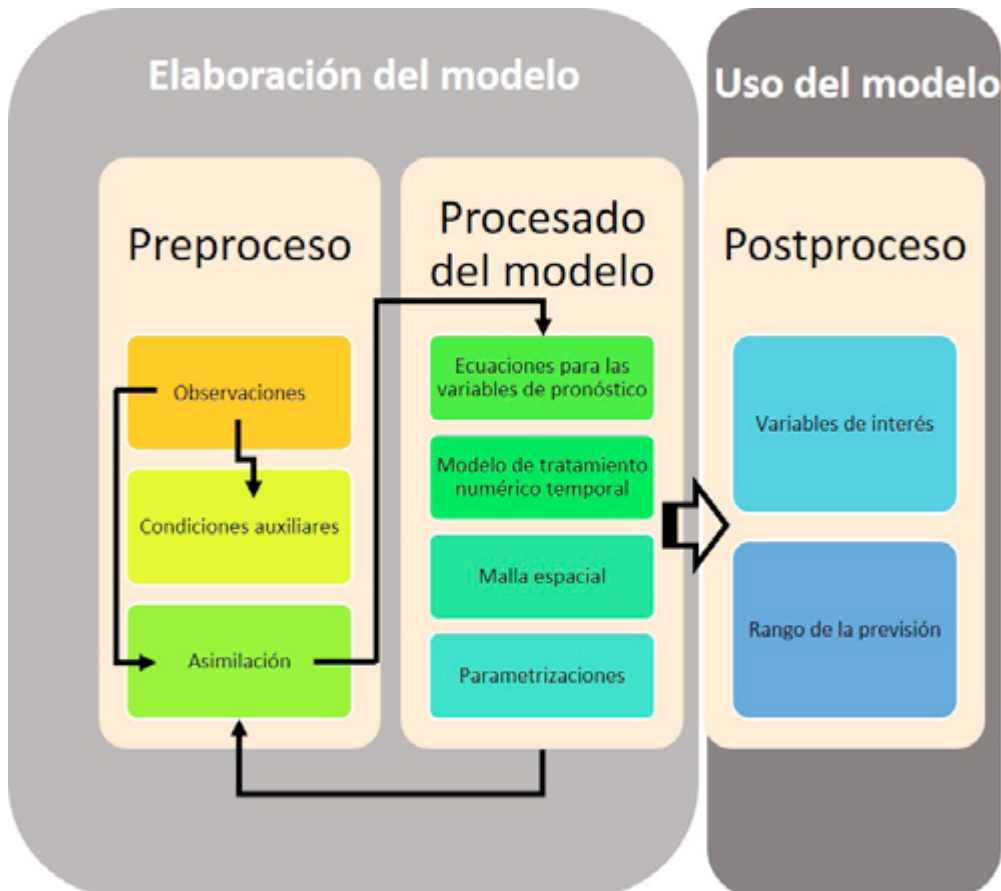


Figura 2.1. Esquema mostrando los componentes principales de un modelo atmosférico.

Los métodos numéricos del núcleo dinámico, previamente mencionados, requieren una discretización del tiempo y el espacio. La **discretización del espacio** se realiza fragmentando el **dominio**, que es la denominación que recibe el espacio de la región geográfica en estudio. El dominio se descompone en una red tridimensional, denominada **mall**, integrada por vóxels o pequeñas celdas espaciales que constituyen los puntos de medición (figura 2.2). Cada vóxel intercambia energía, momento y masa con sus vecinos a través de su contorno o perímetro. El intercambio de aire o agua entre vóxels se denomina **advección**. Las velocidades de intercambio de materia o energía se evalúan descomponiéndolas en tres direcciones: zonal, meridional y vertical.

La **discretización del tiempo** consiste en dividir el lapso de tiempo en estudio desde el momento inicial hasta el final en intervalos denominados **alcances**, que suelen variar entre 30 y 60 min según el modelo (Gardtner *et al.*, 2012). El modelo se inicia en la denominada **pasada**, que es la fecha y hora central de las observaciones, que se asimilan al inicializarlo, y finaliza en la fecha y hora de validez. El lapso de tiempo estudiado es denominado **recorrido**, rango u horizonte. Cuanto mayor sea el número de pequeños alcances fijados, más preciso será el pronóstico, pero requerirá más tiempo de cálculo, por lo que, en la práctica, se debe conseguir una solución de compromiso entre ambos. En cada alcance, el modelo debe resolver las ecuaciones diferenciales para dar valores concretos a todas las variables que intervienen en ellas. Esto debe efectuarse para cada vóxel de la mall tridimensional que abarca la totalidad del planeta, suponiendo la realización de un número muy elevado de operaciones matemáticas en todo el recorrido temporal, que suele ser de décadas, centenares o miles de años. De ahí la necesidad de utilizar supercomputadoras.

Las ecuaciones de pronóstico básicas que describen el sistema climático se resuelven para la mall en sus puntos o vóxels. De este modo, para cada vóxel se calculan valores específicos de las **variables de pronóstico** tales como temperatura, contenido de humedad (humedad relativa) en la atmósfera, salinidad en el mar, vientos, calor transferido, radiación solar y terrestre, hidrología de la superficie terrestre (precipitación, evaporación, nieve derretida y filtrada). También se estudian las interacciones de cada vóxel con sus vecinos, en vertical y en horizontal, durante periodos de tiempo que varían desde siglos hasta ciclos estacionales. La precisión del modelo depende, por una parte, de la resolución de la mall, dada por la dimensión horizontal latitud-longitud, y por otra, de la capacidad matemática para describir las interrelaciones complejas entre los componentes del sistema (figura 2.3). La densidad de la mall no tiene por qué ser homogénea. Además de la distancia horizontal entre puntos vecinos, la mall se caracteriza por el espesor de las capas verticales seleccionadas. Las subdivisiones verticales, denominadas **niveles verticales**, no tienen por qué ser iguales y se incrementan o reducen en función del fenómeno a representar (figura 2.4).

Un problema que presenta la discretización espacio-temporal es la incapacidad para resolver aquellos procesos (atmosféricos u oceánicos) con escalas espaciales o temporales inferiores a la resolución del modelo, por ejemplo, la formación de una nube. Este es uno de los motivos por los que el modelo de cálculo numérico solo proporciona una solución aproximada del modelo climático. Esta solución está constituida por la parte resuelta y una serie de términos que representan todos los procesos que no han podido resolverse explícitamente. Estos términos adicionales, denominados parametrizaciones,

se incluyen en la parte derecha de la solución. La **parametrización** puede definirse como la descripción de un proceso físico no resuelto en el modelo mediante algún tipo de relación matemática entre parámetros importantes que interactúan en el proceso, pero sin modelar explícitamente todo él. Por ejemplo, el albedo de las hojas puede relacionarse con la humedad del suelo estableciendo algún tipo de especificación entre esta y el punto de marchitamiento (parametrización) sin tener que desarrollar un exhaustivo modelo para describir los mecanismos biológicos y físicos mediante los cuales se produce el marchitamiento de las hojas de la planta. Otros ejemplos son los procesos de interacción entre la radiación solar y las gotas de agua de las nubes o la formación misma de las nubes.

En general, las parametrizaciones se aplican a fenómenos que tienen lugar a escalas demasiado pequeñas para ser resueltos directamente. Desde el punto de vista matemático, mediante la parametrización de un fenómeno, se obtiene un sistema cerrado a partir de la formulación del comportamiento estadístico de la parte resuelta del sistema de ecuaciones con la parte del sistema no resuelta, actuando esta última, como una función del sistema resuelto. La parametrización se realiza mediante algoritmos que permitirán representar numéricamente los procesos físicos y funciones directamente derivadas del conjunto de ecuaciones (Rood, 2019; Schlünzen, 2019). Las parametrizaciones son necesarias en los modelos y varían de unos a otros. Por otra parte, no afectan por igual a las variables y constituyen la mayor fuente de incertidumbre del modelo.

Asignando diferentes valores a los parámetros en el modelo climático se comprueba la respuesta del sistema climático y si esta se ajusta a los cambios observados experimentalmente en el clima. La estimación efectuada por el modelo del estado del sistema en un momento dado es comparada con las observaciones proporcionadas por el sistema mundial de telecomunicaciones u otro procedimiento estandarizado. Este segundo proceso de asimilación facilita el “rellenado de huecos” en el modelo, tanto a nivel espacial como temporal, pues permite detectar procesos o fenómenos que no habían sido considerados en el diseño conceptual inicial e incluirlos en él.

La elaboración de un modelo climático o **modelado**, en un sentido más amplio, puede ser concebida como un proceso dividido en dos fases (figura 2.1):

- *Elaboración del modelo*: esta fase es realizada por los climatólogos a cargo del diseño del modelo e incluye todas las actuaciones incluidas en las fases ya descritas de preprocesado y procesado. En esta fase tienen lugar también el testado interno del modelo y la detección de errores de usuario por testado de código interno.
- *Uso del modelo*: llevado a cabo por el usuario que es responsable de la coherencia del modelo en relación al fenómeno estudiado y de la validez de los datos introducidos. El usuario también especifica el modo en que el modelo es inicializado definiendo condiciones iniciales y de contorno, períodos de tiempo usados, tamaño del dominio de uso y resolución de la malla, así como el refinado de los resultados, por ejemplo, mediante interpolaciones en el espacio o el tiempo (Schlünzen, 2019).

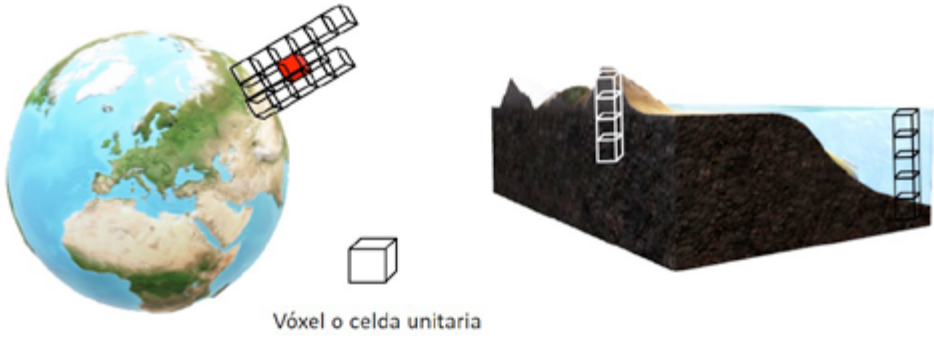


Figura 2.2. Esquema de malla 3D utilizada en los modelos climáticos.

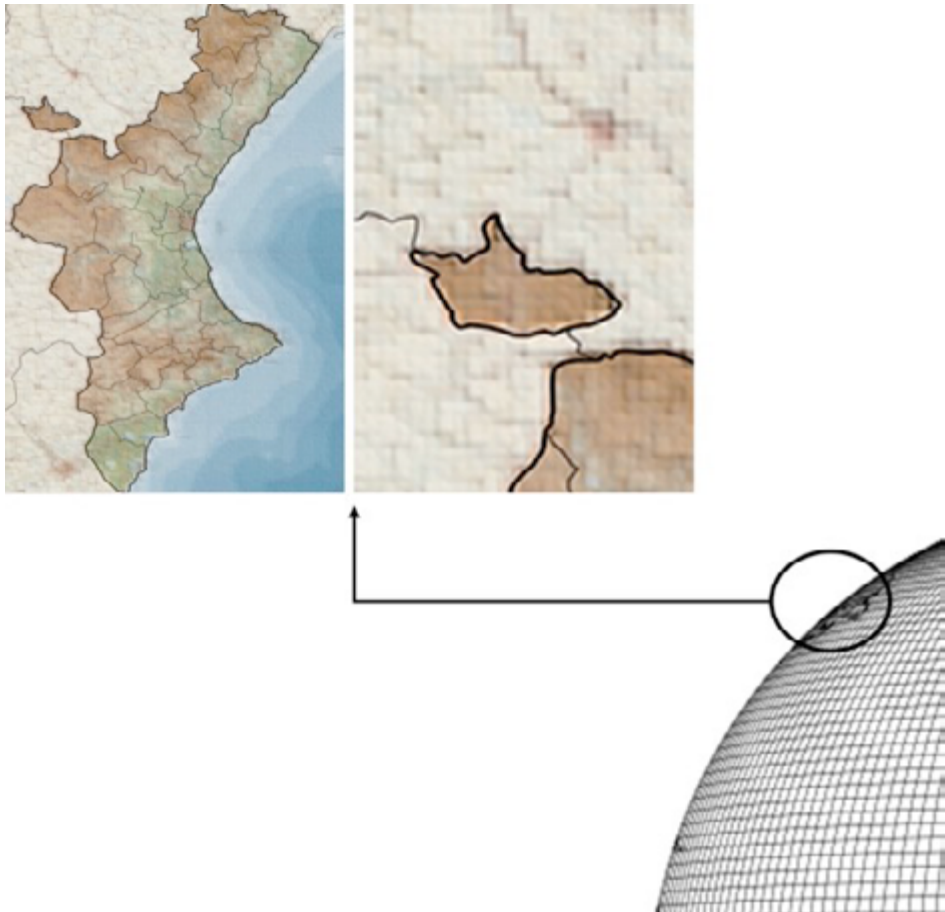


Figura 2.3. Diagrama mostrando diferentes resoluciones de malla usadas para estudiar dominios de distinto tamaño. Ejemplificación utilizando el entorno de la Comunitat Valenciana.

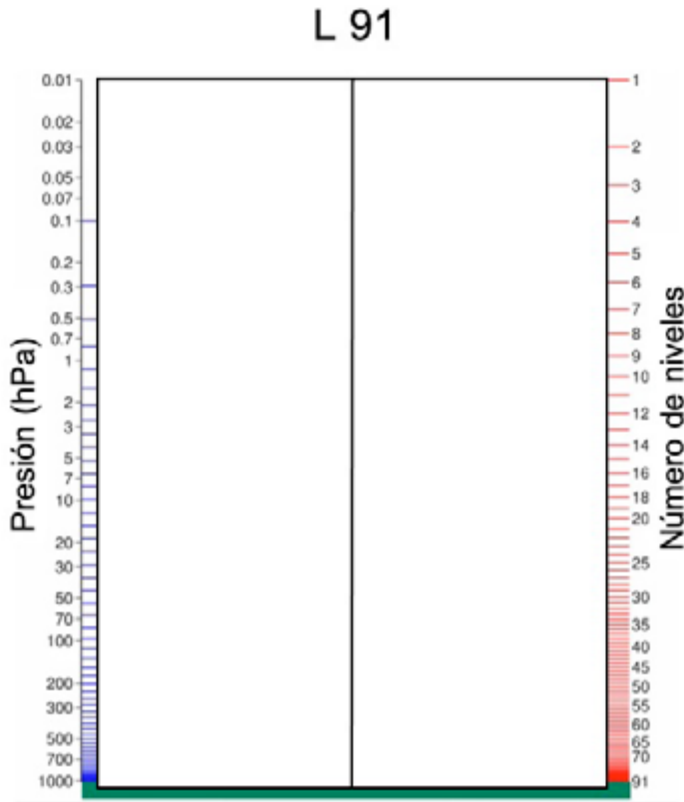


Figura 2.4. Esquema mostrando el diagrama de 91 niveles verticales del modelo determinista operativo T799L91 que introdujo el Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (CEPPM/ECMWF) en 2006. La resolución espacial para la latitud de la Comunitat Valenciana en este modelo es de 20 km de punto de malla o rejilla.

Los modelos climáticos han evolucionado considerablemente desde los primeros, que aparecieron en la década de 1970. A partir de 1988 se crea el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) dentro del Programa de Medioambiente de las Naciones Unidas y de la Organización Mundial de Meteorología (WMO, por sus siglas en inglés) dedicado al asesoramiento en ciencia del cambio climático. Los modelos climáticos globales⁶ que ha venido utilizando el IPCC, a raíz de los seis informes publicados sucesivamente por este organismo (el último en 2023), han ido ganando en complejidad. En cada informe y, de forma progresiva, las sucesivas generaciones de modelos climáticos utilizados han ido incorporado nuevos procesos o componentes en el sistema climático que los han hecho más sofisticados y complejos. Los modelos de clima global que han desarrollado los climatólogos también han ido incrementando la resolución horizontal en las simulaciones del clima a corto plazo.

En la actualidad, los modelos climáticos incluyen **modelos componentes** que son modelos físicos que representan procesos específicos de la atmósfera, el océano, los

⁶ Aquellos que abarcan el sistema climático terrestre al completo.

continentes, los continentes helados, modelos químicos, geológicos o biológicos, que interactúan entre sí dentro de los sistemas climáticos. A título de ejemplo, la Version 3 del Community Climate System Model (CCSM)⁷ diseñada por la University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) y la National Corporation for Atmospheric Research (NCAR) de los Estados Unidos incluye: energía solar que llega a la Tierra, energía calorífica emitida por la Tierra, formaciones de nubes en la atmósfera (estratos, cirros, cúmulos), intercambio de energía calorífica y evaporativa, transición de nieve sólida a vapor en las regiones heladas, precipitación en forma de lluvia y evaporación del suelo y del mar, humedad del suelo, intercambio de calor y salinidad en los océanos, corrientes oceánicas, temperatura y salinidad del aire y procesos en la superficie terrestre que describen el comportamiento de la cubierta nevada, vegetación, reflectividad, topografía y uso del terreno, orografía, topografía del fondo oceánico, modelo oceánico de capas, etc. Acoplando y combinando adecuadamente los modelos componentes se construye el modelo climático. Este último es, por tanto, entendido como el **modelo acoplado** que integra todos los modelos componentes. De este modo, el método estandarizado para elaborar modelos climáticos consiste en efectuar una descomposición del modelo general en modelos componentes de cada proceso individual. La combinación consistente de los modelos componentes es una de las mayores dificultades de la elaboración del modelo. La figura 2.5. muestra los principales agentes de forzamiento o impulsores del clima incluidos en los diferentes modelos climáticos globales desarrollados sucesivamente y cómo se ha ido incrementando la complejidad de los modelos.

2.2. Tipos de modelos climáticos

Los modelos climáticos pueden clasificarse de modo amplio en modelos físicos y modelos químicos. Los primeros ponen el foco en simular los procesos físicos del sistema climático. Los segundos están dirigidos al conocimiento de los cambios en la composición química del sistema climático. Ambos modelos pueden combinarse para describir mejor el sistema climático (Seinfeld y Pandis, 2006).

Desde una perspectiva epistemológica amplia, Rood (2019) discrimina cuatro tipos de modelos. En los **modelos mecánicos** se prescriben ciertos valores que configuran las condiciones de contorno de manera que el sistema evoluciona en relación a los parámetros prescritos. Los primeros modelos climáticos fueron modelos mecánicos de la atmósfera con la tierra, el hielo y el océano como condiciones de contorno. Los modelos climáticos han evolucionado de modo que, hoy en día, los más avanzados son **modelos comprensivos** que se han ido complicando por acoplamiento de modelos componentes, de la atmósfera, tierra, océano y hielo. Estos modelos describen las interacciones relevantes que tienen lugar en el sistema climático. Los **modelos heurísticos** describen el clima a una gran escala temporal (períodos largos de tiempo) y representan el comportamiento del sistema basándose en consideraciones teóricas fundamentales (conservación de la energía, masa, momento...). La coincidencia o ajuste de un modelo comprensivo con otro heurístico indica que el comportamiento de las variables es consistente con las consideraciones iniciales realizadas. La consistencia es un buen indicador de la variabilidad y la precisión del modelo. Los **modelos estadísticos** están basados en campañas intensivas de observaciones y proporcionan relaciones estadísticas entre las variables observadas y el comportamiento

⁷ Actualmente ya hay una versión 4.0.

del sistema dinámico, lo que permite realizar parametrizaciones que caracterizan el comportamiento del sistema a escala local. Este tipo de modelos se utiliza para predecir el comportamiento futuro del sistema mediante la observación del comportamiento del sistema en el pasado.

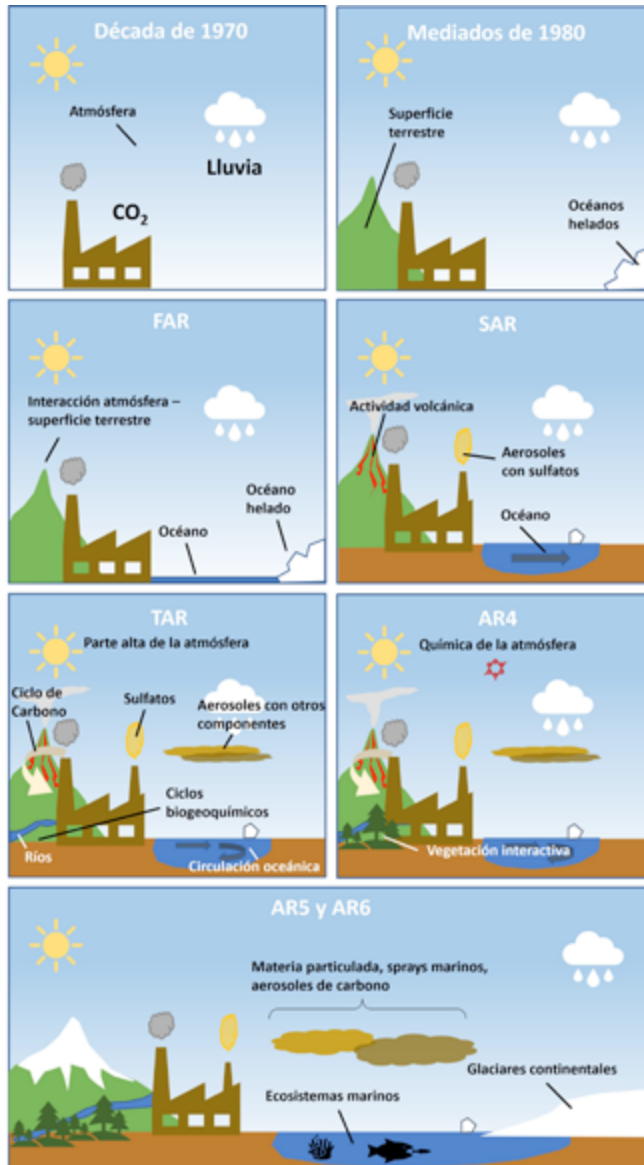


Figura 2.5. Evolución histórica de los modelos climáticos desde la década de 1970. Adaptado de Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). Primer Informe de Evaluación (First Assessment Report, FAR); Segundo Informe de Evaluación (Second Assessment Report, SAR), Tercer Informe de Evaluación (Third Assessment Report, TAR); Cuarto Informe de Evaluación (Fourth Assessment Report, AR4), Quinto Informe de Evaluación (Fifth Assessment Report, AR5), Sexto Informe de Evaluación (Sixth Assessment Report, AR6).

Sin embargo, la mayoría de clasificaciones dadas en la bibliografía especializada catalogan los modelos climáticos atendiendo a su complejidad. Las diferencias de unas clasificaciones a otras radican en los diferentes criterios que se establecen para describir el grado de complejidad de los modelos. Según el IPCC, la complejidad de un modelo climático, de modo general, puede evaluarse a partir de la correlación entre las tres características formales principales que definen el modelo (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007) (figura 2.6):

- El número de componentes del sistema climático que interactúan en el sistema climático y que están explícitamente representados en el modelo.
- El número de procesos explícitamente simulados en el modelo.
- El detalle con que se realiza la descripción de los dos primeros.

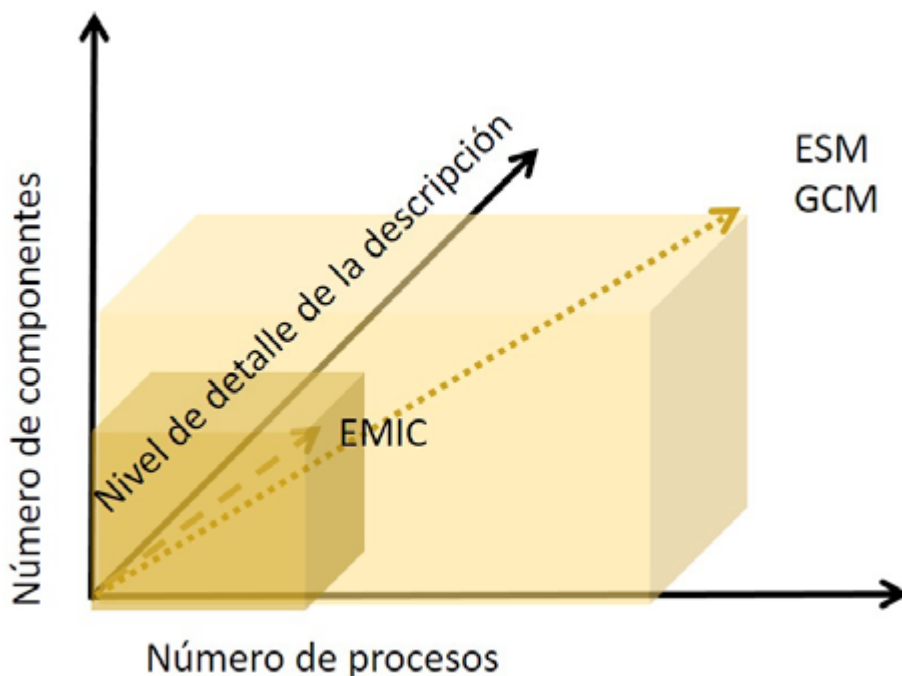


Figura 2.6. Correlación entre las principales características formales de los modelos climáticos.

Rose (n.d.) clasifica los modelos de acuerdo a su resolución y el número de componentes del sistema climático que se combinan. Siguiendo este criterio establece cinco grupos: modelos de balance de energía (EBMs, por sus siglas en inglés), modelos radiativo-convectivos (RCs, por sus siglas en inglés) o modelos de columna simple (SCMs, por sus siglas en inglés), modelos constreñidos dimensionalmente (DCMs, por sus siglas en inglés), modelos de circulación general (GCMs) y modelos de sistema terrestre (ESMs).

Siguiendo también el criterio de nivel de complejidad del modelo, Flato *et al.* (2013) discriminan entre EBMs, que consideran los modelos más simples, modelos del sistema

terrestre de complejidad intermedia (EMICs, por sus siglas en inglés) que incluyen todos los componentes físicos del modelo climático e incorporan nuevos componentes que simulan la bio-geo-química de la tierra y el océano, modelos de circulación general atmósfera-océano (AOGCMs, por sus siglas en inglés) y modelos de sistema terrestre⁸ (ESMs, por sus siglas en inglés) que incluyen un elevado número de componentes y procesos y poseen mayor resolución que los EMICs.

Otras clasificaciones de los modelos climáticos se basan en su resolución, parametrización e integración. Esta última propiedad expresa el nivel de interacción entre los componentes del sistema climático que proporciona el modelo.

Siguiendo el criterio de Farmer y Cook (2013), seguidamente se describen cinco tipos de modelos climáticos con complejidad creciente.

2.2.1. Modelos de cajas

En este tipo de modelos el sistema climático se divide en cajas (vóxeles). En el interior de cada caja las concentraciones de los constituyentes atmosféricos son homogéneas, si bien pueden cambiar con el tiempo. Esta clase de modelos se usa para describir los flujos y corrientes a través de los océanos o el ciclo de carbono. También se usa para estudiar sistemas medioambientales, ecosistemas y sistemas de circulación oceánica. El modelo se puede complicar incorporando otras características como el uso del suelo, lo que permite predecir la interacción entre clima y ecosistema (Walker, 1991; Worsley y Kidder, 1991; Henderson-Sellers y McGuffie, 1987). Este modelo también se acostumbra a combinar con otros que seguidamente se describen.

2.2.2. Modelos de balance de energías

Los modelos de balance de energías (energy balance models, EBM) no describen las características dinámicas del sistema climático (el régimen de vientos, los sistemas y circulación atmosférica a gran escala, las corrientes oceánicas o las corrientes convectivas en la atmósfera o en los océanos) sino que determinan los cambios en el sistema climático considerando la termodinámica del sistema (calor, temperatura) y el balance de energía global en el sistema en equilibrio, de manera que se puede predecir la temperatura efectiva de la Tierra y la temperatura en superficie (Kleidon y Lorenz, 2004; Schlesinger, 2007; North y Stevens, 2006).

En los EBMs, al igual que en los modelos adimensionales, se simula el balance global de radiación solar que llega a la Tierra y la que se emite desde esta (figura 2.7). Alternativamente, se puede aplicar a regiones situadas a una latitud determinada para estudiar la energía transferida dentro del sistema terrestre. En ese caso, hay que contar con ecuaciones que describen la transferencia de energía entre esa banda latitudinal y sus vecinas. Los modelos EBMs pueden ser 0-dimensionales y 1-dimensionales. Los 0D-EBMs son los modelos más simples en los que la Tierra es un punto en el espacio. Estos modelos pueden complicarse estableciendo un número variable de capas en la atmósfera en las que la temperatura y el valor de emisión energética es constante. Cuanto mayor es el número de capas en altura mayor es la complejidad del modelo. En los 1D-EBMs se

⁸ Los EMICs se clasifican en modelos estadístico-dinámicos, modelos de balance energía-humedad, modelos quasi-geostróficos y modelos de ecuación primitiva.

establecen diferencias latitudinales y se modelan las temperaturas en cada banda de latitud comparando una temperatura global con la temperatura latitudinal. Con esta clase de modelos se han simulado también las transferencias de energía que se establecen entre el océano y la atmósfera (North y Stevens, 2006).

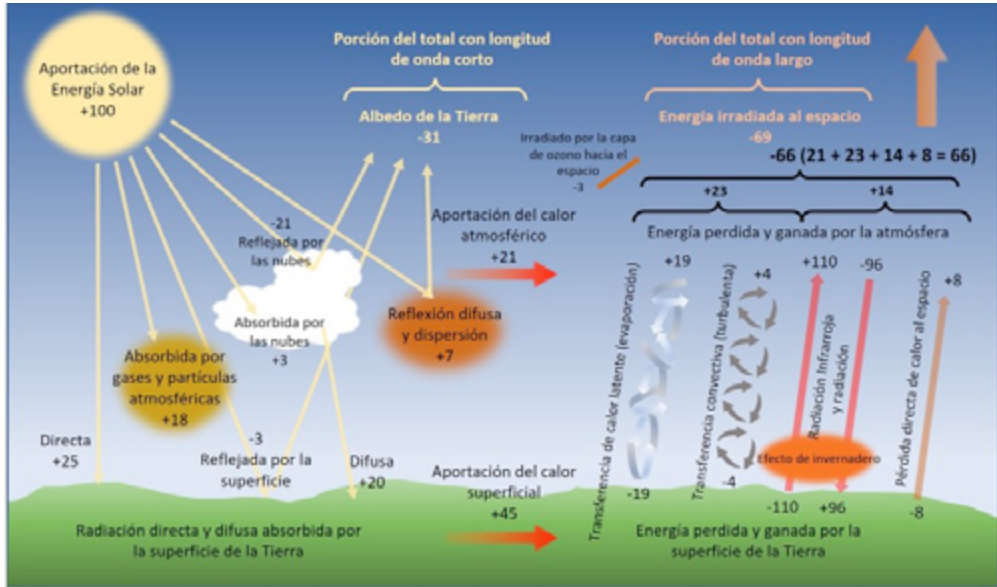


Figura 2.7. Balance global y distribución de energía solar a través de la atmósfera. Adaptado de <https://www.e-education.psu.edu/meteo469/?q=node/202>.

2.2.3. Modelos radiativo-convectivos

Los OD-EBMs pueden refinarse dando lugar a los modelos radiativo-convectivos (radiative-convective models, RCMs). Los 1D-RCMs simulan la transferencia de energía a través de la atmósfera, pero incorporan una nueva dimensión, la altitud, con respecto a los EBMs. En los 1D-RCMs se considera que la energía se transporta en vertical mediante los procesos convectivos en vertical y por las diferencias radiativas que tienen lugar cuando la energía se transfiere verticalmente a través de la atmósfera (1D-RCMs). Si, además, se consideran los cambios en la dirección horizontal, los modelos adquieren una dimensión espacial más, dando lugar a los 2D-RCMs. La principal mejora que ofrecen los RCMs es que permiten hacer una estimación del efecto resultante de la variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) sobre la capacidad emisiva efectiva de energía y, por ende, de la temperatura en superficie. La adición al modelo de parámetros tales como el albedo, el efecto de las nubes, la turbidez atmosférica y los efectos entre las diferentes capas atmosféricas, exige la determinación de la capacidad emisiva local y la estimación de los factores que controlan el sistema climático. Los RCMs permiten calcular velocidades de calentamiento de las capas atmosféricas y perfiles verticales y son particularmente eficaces en la caracterización de cambios asociados a agentes de forzamiento originados en los intercambios entre la Tierra y la atmósfera como, por ejemplo, las erupciones volcánicas (Ramanathan y Coakley, 1978).

2.2.4. Modelos estadístico-dinámicos

Los modelos estadístico-dinámicos (statistic-dynamic models, SDMs), son modelos multidimensionales. Son modelos que consideran las dos dimensiones, vertical y horizontal, preferentemente, aunque también se han desarrollado modelos que incorporan dos dimensiones horizontales. Se caracterizan por combinar la transferencia horizontal de energía con la transferencia vertical radiativa-convectiva de los modelos RCM. Para calcular la difusión de energía a través del sistema climático se utilizan las leyes clásicas de la cinemática. En los SDMs la velocidad del viento se estima mediante relaciones estadísticas. Los SDMs se usan principalmente en la investigación de la transferencia de energía horizontal y de los procesos que afectan a esta (Franchito y Rao, 2015), si bien cabe señalar que la transferencia de energía entre el polo y el ecuador se simula mejor con los modelos EBM.

2.2.5. Modelos de circulación general y modelos de sistema terrestre

Los modelos de circulación general (general circulation models, GCMs) y los modelos del sistema Tierra o sistema terrestre (Earth system model, ESM), también denominados modelos de clima global, son los más complejos ya que son modelos tridimensionales (3D-GCMs). Los GCMs tienen en cuenta el comportamiento de la atmósfera, la biosfera, la geosfera, la hidrosfera y la criosfera, sus procesos internos y sus interacciones y retornos en las diferentes partes del planeta para describir el comportamiento del sistema global climático. Los GCMs son modelos acoplados que se componen de conjuntos de modelos que describen diversos procesos. En su elaboración, entre otras leyes básicas de la física se consideran, la conservación de la energía, la conservación del momento, la conservación de la masa y las leyes de los gases ideales. El primer GCM fue diseñado en la década de 1960 por la U.S. National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) combinando procesos atmosféricos y oceánicos. En la década de 1980 el U.S. National Center of Atmospheric Research (NCAR) desarrolló el Modelo Comunitario de la Atmósfera (Community Atmosphere Model) que ha sido refinado dando lugar al actual Modelo Comunitario del Sistema Tierra (Community Earth System Model (CESM)). El CESM es un modelo en el que el clima mundial está completamente acoplado, lo que permite producir simulaciones del clima en el momento presente, del pasado y del futuro de la Tierra (Collins *et al.*, 2004). Otros GCMs acoplan los procesos entre la atmósfera y el océano, como el HadCM4, diseñado por el Hadley Centre for Climate Prediction and Research, que ha sido usado en el ASR3 (Collins *et al.*, 2001), o incorporan el efecto de la vegetación (Xue y Fennessey, 1996). Los GCMs sólo calculan factores globales, lo que requiere determinar todos los parámetros en cada punto-nodo del globo terráqueo. Los GCMs deben ser testados a nivel de sistemas climáticos mediante la comparación de la simulación proporcionada con las observaciones experimentales, y a nivel de componentes del sistema mediante su aislamiento y evaluación individual. Estos modelos son revisados y evaluados por grupos internacionales como el participante en el Programa para la Intercomparación y Diagnóstico de Modelos Climáticos (PCMDI, por sus siglas en inglés) que efectúan intercomparaciones. Un tipo de GCM muy utilizado es aquel que considera la atmósfera y el océano de forma acoplada, se trata del modelo de circulación general atmósfera-océano acoplados (AOGCM, por sus siglas en inglés). Los AOGCM se completan

incorporando representaciones matemáticas empíricas o semiempíricas de la criosfera, la superficie del suelo, la cubierta vegetal, el ciclo del carbono, la dinámica de la vegetación y los procesos que afectan a los aerosoles en la atmósfera.

Actualmente, las simulaciones obtenidas con los modelos climáticos reproducen de manera muy satisfactoria la evolución del clima. En particular se ha caracterizado muy adecuadamente la temperatura global durante los últimos 150 años. Además, se ha podido discernir cuál ha sido la contribución de las actividades humanas al cambio experimentado por el clima con un grado de confianza razonable (Stott *et al.*, 2001).

2.2.6. Modelos del sistema terrestre de complejidad intermedia

A medida que se fue desarrollando la tecnología de la supercomputación los modelos climáticos evolucionaron pasando de modelos conceptuales más inductivos a los GCMs y, de estos, a los ESMs que operan a las más elevadas resoluciones espacial y temporal. Estos modelos se caracterizan por requerir el uso de supercomputadoras por la gran cantidad de cálculo numérico requerido. Esto hizo que muchas universidades y centros de investigación climática no pudieran usar ni diseñar este tipo de modelos por falta de capacidad de sus sistemas informáticos y derivaran sus investigaciones hacia un tipo de modelos climáticos del sistema terrestre denominados, genéricamente, modelos de sistema terrestre de complejidad intermedia (EMICs, por sus siglas en inglés). Estos modelos requieren mucha menos capacidad computacional que los ESMs, lo que ha permitido la elaboración de gran número de ellos y, actualmente, se pueden encontrar EMICs de características muy diversas. Los EMICs, al igual que los ESMs, proporcionan una representación realista de las estructuras geográficas de la Tierra a gran escala. En algunos EMICs, el número de procesos y el detalle de la descripción se reduce para simular las interacciones de tantos componentes del sistema como sea posible. En otros EMICs, el sistema se constituye con pocos componentes interactuando para realizar conjuntos de experimentos a largo-plazo que estudian la variabilidad del sistema climático.

2.2.7. Otros modelos

Desde finales del siglo XX se han venido desarrollando otros modelos que describen sistemas naturales que tienen relación directa con el clima y en los que la atmósfera es considerada, de forma más general, realizando procesos de intercambio con otros sistemas. Estos modelos se acoplan a los modelos climáticos básicos, mencionados previamente, que están centrados en la descripción de la atmósfera. Cabe mencionar los modelos oceánicos de difusión-afloresamiento en los que la atmósfera intercambia calor con el océano y la superficie de la tierra subyacente, modelos de circulación general oceánicos tridimensionales (GCMO, por sus siglas en inglés) que pueden acoplarse con el modelo de circulación general atmosférico (GCMA, por sus siglas en inglés) dando lugar al modelo de circulación general atmosférico-oceánico (MCGAO, por sus siglas en inglés). De carácter eminentemente químico son los modelos de ciclo de carbono que permiten estudiar la acumulación en la atmósfera y en el océano de dióxido de carbono de origen natural y antropogénico. Los modelos de química atmosférica y aerosoles se fundamentan en el estudio de la distribución de ozono y del resto de gases de efecto invernadero, considerados

responsables de gran parte de la reactividad que tiene lugar en la atmósfera. Los modelos de capa de hielo estudian los casquetes polares para conocer el impacto de su evolución sobre la variación del nivel del mar. Otros modelos se centran en la representación de la superficie del suelo, la cubierta vegetal y la dinámica de la vegetación.

2.3. Validación

La **evaluación** de un modelo climático describe, de manera global, los procesos de análisis cuantitativo y cualitativo que permiten conocer la capacidad del modelo climático para dar respuesta a la aplicación o uso para el que fue diseñado. En suma, se pretende estimar la calidad y el valor del modelo. La calidad viene dada por la correspondencia entre las observaciones y la predicción y el valor viene determinado por la utilidad del modelo, en la práctica, para tomar decisiones (Santos Burguete y Pastor Saavedra, 2020). La evaluación de los modelos climáticos se lleva a cabo mediante procesos de validación y verificación. La norma VDI 3783 Parte 9 define la **validación** como,

“...un examen para encontrar con qué nivel (con qué exactitud) el programa informático describe el fenómeno modelado dentro del ámbito formal del modelo” (VDI, 2017b).

La validación es un examen de la fiabilidad que presenta el modelo climático para reproducir los principales procesos que tienen lugar en el sistema climático. La validación puede realizarse por comparación sistemática de los resultados de simulaciones con condiciones de clima actual y datos climatológicos observados. Estas primeras se efectúan considerando la evolución de concentraciones observadas de GEIs. Otra forma de validación se sirve de condiciones paleoclimáticas como las habidas en la era glacial.

La validación de un modelo climático consiste en la comparación de la simulación obtenida con las observaciones experimentales de los cambios climáticos, o bien en la realización del análisis correspondiente. La validación de un modelo abarca diversos procesos. La **validación científica** es el proceso que evalúa la capacidad del modelo para describir los tipos de problemas geofísicos para los que fue diseñado. La **validación estadística** determina el valor medio, la dispersión y variabilidad del modelo. Se utiliza un **sistema de validación**, consistente en la comparación de la simulación que hace el modelo a partir de un paquete de observaciones con la simulación que proporciona un sistema de modelado de referencia, ya validado. La **validación procesual** evalúa la capacidad del modelo para representar el fenómeno cuasi-individual e identificar sus causas y efectos.

Atendiendo al tipo de información proporcionada se suele distinguir entre la **validación subjetiva**, que se basa en estimaciones cualitativas efectuadas por expertos. Esta validación proporciona, preferentemente, datos e información diagnóstica que permite identificar las fortalezas y debilidades del modelo. En contraste la **validación objetiva** se basa en datos cuantitativos, con carácter estadístico, pero menos útiles en el diagnóstico (Santos Burguete y Pastor Saavedra, 2020). La **validación diagnóstica** se sirve de las dos anteriores para detectar debilidades y fortalezas del modelo basándose en datos cuantitativos objetivables.

El plan de validación se desarrolla a través de diversas etapas tal como muestra la figura 2.8:



Figura 2.8. Etapas de un plan de validación de un modelo climático.

Con este esquema de trabajo se aspira a que el proceso de validación tenga independencia, transparencia y objetividad como valores científicos primordiales (Theis y Baldauf, 2019).

La **verificación** evalúa la integridad informática del código de programación. Incluye comparaciones con problemas analíticos de referencia, datos sintéticos y computación de alta resolución mediante métodos que suelen estar estandarizados (Wilks, 2011; Stensrud y Yussouf, 2007). En estos procesos se utilizan unas métricas denominadas *scores* (Santos Burguete y Pastor Saavedra, 2020).

Los criterios de validación y verificación se pueden resumir en (Rood, 2019):

- La corrección de las ecuaciones que representan los fenómenos.
- La exactitud de la representación de las ecuaciones en el modelo matemático utilizado para elaborar el programa informático.
- La corrección de la implementación en el ordenador.
- La construcción de un modelo coherente por acoplamiento de los modelos componentes en los que han sido descompuestos los procesos físicos y las funciones.
- La capacidad de los modelos componentes y los modelos acoplados para reproducir las observaciones de los procesos físicos, químicos y biológicos.
- La capacidad del modelo acoplado y los modelos componentes para satisfacer los principios fundamentales de conservación de energía, masa y momento.

La independencia de la validación se consigue mediante un sistema de evaluación llevado a cabo por expertos independientes que no hayan participado en la elaboración del modelo. Esto se logra abarcando una comunidad de expertos muy amplia. El Proyecto de Intercomparación de Modelos de Clima Acoplados (CMIP, *por sus siglas en inglés*) constituye el marco de validación diseñado para mejorar la calidad y el valor de los modelos climáticos globales. Fue organizado en 1995 por el Grupo de Trabajo en

Modelos Acoplados (WGCM, por sus siglas en inglés) del Programa de Investigación del Clima Mundial (WCRP, por sus siglas en inglés). Está diseñado para ser desarrollado en fases, con el propósito de mejorar los sucesivos modelos de clima, pero también para informar a las agencias nacionales e internacionales acerca de posibles acciones para mitigar los efectos del cambio climático. Este proyecto es equivalente al Proyecto de Intercomparación de Modelos Atmosféricos (AMIP, por sus siglas en inglés), que es un procedimiento estandarizado de validación de modelos de circulación general (GCMs) auspiciado por el Grupo de Trabajo de Experimentación Numérica (WGNE, por sus siglas en inglés). El CMIP también es desarrollado dentro del WCRP y es gestionado en el PCMDI. En este proyecto participa prácticamente toda la comunidad internacional de modelado climático (Gates *et al.*, 1998). La European Space Agency (ESA) participa en el CMIP.

2.4. Proyecciones climáticas

Las proyecciones climáticas constituyen el método de trabajo utilizado por los climatólogos para estudiar el clima futuro y la incidencia que el cambio climático tendrá en él. El carácter exploratorio y probabilístico de este tipo de investigación se plasma adecuadamente en la expresión “proyección climática” adaptada del término inglés *climate projection*.⁹

2.4.1. Fundamentos

Como se ha descrito en el apartado anterior, cuando se acomete un estudio sobre el clima futuro, a plazos largos de décadas o centurias, es necesario realizar simulaciones numéricas basadas en los modelos climáticos que permiten hacer estimaciones de la evolución del clima en promedio y de su variabilidad en función de las diferentes condiciones iniciales y de contorno introducidas. El IPCC define la proyección climática como (Amblar Francés, 2017):

“...la respuesta simulada del sistema climático a diversos escenarios de emisiones o de concentraciones futuras de los GEI y aerosoles, frecuentemente basada en simulaciones de modelos climáticos”.

Las **predicciones climáticas** habituales, predicciones meteorológicas o pronósticos del tiempo se efectúan a partir de condiciones iniciales realistas que se basan en observaciones, por lo que los valores iniciales son los principales determinantes y proporcionan pronósticos cercanos que no suelen superar una o dos décadas. A diferencia de las predicciones climáticas, en las proyecciones climáticas se amplía el rango temporal de la predicción a más largos plazos de varias décadas o centurias, por lo que, en el sistema dinámico, las condiciones iniciales progresivamente van perdiendo su influencia que pasa a ser dominio de los cambios impuestos en el sistema por las condiciones de contorno. Por este motivo, la estimación de las posibles evoluciones deja de denominarse predicción y pasa a ser una proyección climática (Rodríguez Camino *et al.*, 2020).

⁹ El término equivalente en castellano al término inglés *project* es “proyección”. En relación a los modelos climáticos, este término se usa comúnmente con el mismo significado concreto que posee en inglés, por ejemplo, en la página web de AEMET, previamente citada, la expresión “proyecciones climáticas” es utilizada abundantemente. Consultado el Diccionario RAE, ninguno de los significados dados ahí a esta palabra se ajusta al que se le otorga en climatología, por lo que se considera un anglicismo.

2.4.2. Escenarios

Las proyecciones climáticas son un intento de simular el estado futuro del clima de la Tierra o de alguna región concreta, para lo cual se utilizan los GCMs (atmósfera-océano) o los ESMs, que utilizan ecuaciones matemáticas que incluyen características físicas, químicas y biológicas de los ecosistemas. También se consideran las interacciones con el sistema humano, que posee sus propias características, sociales, económicas, tecnológicas, ambientales y de desarrollo demográfico. Todas ellas condicionan los ciclos de elementos como el ciclo del carbono. En estos modelos se aplican, a modo de hipótesis, condiciones de forzamiento que producen las correspondientes evoluciones de los niveles de GEI y aerosoles en la atmósfera. Estas condiciones de forzamiento se establecen conforme a la previsión de emisiones resultantes de la actividad humana bajo diferentes supuestos de evolución del desarrollo socioeconómico, tecnológico y demográfico en el mundo (crecimiento de la población, demanda energética, uso eficiente del crecimiento económico global, etc.) y conforme a la previsión de la modulación de todos estos por factores políticos. El IPCC en el **cuarto informe especial de escenarios de emisiones** (IE-EE), que se incluyó en el cuarto informe de evaluación (AR4, por sus siglas en inglés), desarrolló cuatro **líneas evolutivas** (*storylines*) que describen de modo consistente las relaciones existentes entre las fuerzas motrices de las emisiones y su evolución, incorporando el contexto socioeconómico y tecnológico, lo que permitía efectuar una cuantificación del estado alcanzado finalmente con esa trayectoria evolutiva. Para cada línea evolutiva se elaboraron diversos escenarios que se sustentaban en diferentes supuestos de los factores motrices. Estas previsiones fueron denominadas escenarios de emisiones. Se trata de posibilidades alternativas de futuro dependientes de factores difícilmente predecibles. Por tanto, un **escenario de cambio climático** “...es una descripción coherente, internamente consistente y plausible de una evolución futura posible del clima” (Gaertner *et al.*, 2012). Los escenarios consideraban una amplia variedad de fuerzas motrices de la evolución demográfica, económica y tecnológica relacionada con los GEI y SO_2 . Para cada escenario se cuantificaba la evolución de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO_2), SO_2 , metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF_6), hidroclorofluorocarbonos (HCFC), clorofluorocarbonos (CFC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles, agentes precursores de aerosoles y diversos gases químicamente activos. Para ello se ensayaron conjuntos de simulaciones con distintas condiciones iniciales, de contorno y parametrizaciones, que reproducían las diversas situaciones que podrían generarse por la emisión de GEI y los distintos forzamientos, entre otras condiciones. Esta multiplicidad de modelos generó cuarenta escenarios que abarcan todas las posibles incertidumbres relacionadas con la producción de GEI (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000). Estos cuarenta escenarios se obtenían a partir de las cuatro líneas evolutivas o familias en las que los escenarios se agrupan en seis conjuntos. Dentro de cada familia se elaboraron dos tipos diferentes de escenarios. El primer grupo incluía escenarios basados en hipótesis armonizadas sobre el crecimiento económico, la demografía y el uso energético. El otro grupo se basaba en la realización de cuantificaciones alternativas de la línea evolutiva. Estos seis tipos de escenarios se denominaron del mismo modo que su correspondiente familia evolutiva: A1, A2, B1 y B2. En cada grupo de escenarios se establecen unos valores de temperatura y nivel del mar, entre otros factores de cambio (figura 2.9):

- Escenario B1: Incremento de temperatura de 1,1 a 2,9 °C y aumento del nivel del mar, 20 cm.
- Escenario A1T: Incremento de temperatura de 1,4 a 3,8 °C y aumento del nivel del mar, 25 cm.
- Escenario B2: Incremento de temperatura de 1,4 a 3,8 °C y aumento del nivel del mar, 23 cm.
- Escenarios A1B: Incremento de temperatura de 1,7 a 4,4 °C y aumento del nivel del mar, 27 cm.
- Escenario A2: Incremento de temperatura de 2,0 a 5,4 °C y aumento del nivel del mar, 28 cm.
- Escenario A1F1: Incremento de temperatura de 2,4 a 6,4 °C y aumento del nivel del mar 33 cm.

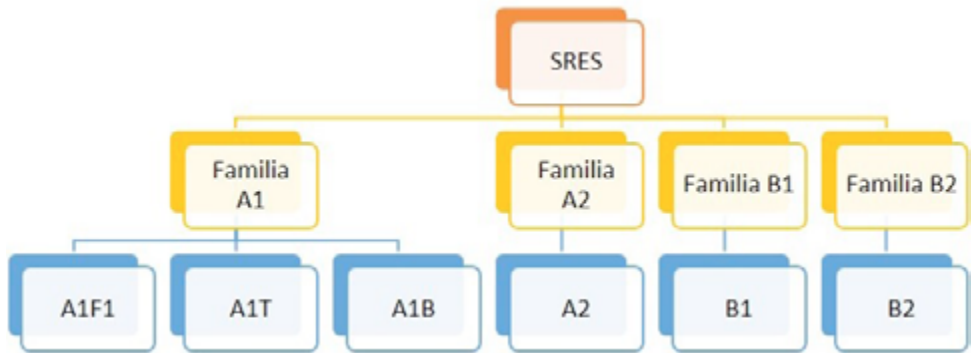


Figura 2.9. Esquema de los seis grupos de escenarios diseñados por el IPCC a partir de las cuatro líneas evolutivas establecidas en el AR4.

En el quinto IE-EE, emitido dentro del quinto informe de evaluación (AR5 por sus siglas en inglés), el IPCC reduce los escenarios a cuatro y los redefine como **Rutas de Concentración Representativas**¹⁰ (RCP, por sus siglas en inglés) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013). Se utiliza el término “representativa” para indicar que los valores de concentración son seleccionados entre todos los posibles escenarios que conducirían a esas condiciones específicas de forzamiento radiativo. Con el término “trayectoria” se pone énfasis en el camino o evolución que conduce a esos niveles de concentración a largo plazo, generalmente, hasta 2100. El valor de forzamiento radiativo en cada escenario se calcula efectuando estimaciones de las emisiones de GEI en función de condiciones socioeconómicas, demográficas, etc. (tabla 2.1). El escenario RCP8.5 establece los valores más elevados de emisiones. Los escenarios RCP6.0 y RCP4.5 consideran una mitigación de grado medio y finalmente, el escenario RCP2.6 establece el nivel de emisiones más bajo (AEMET, 2017).

¹⁰ También se las denomina Sendas o Trayectorias de Concentración Representativas.

Tabla 2.1. Valores de forzamiento radiativo estimados para las RCPs del AR5. Adaptado de AEMET (2017).

Características	Escenario RCP			
	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Forzamiento radiativo (FR) ($W m^{-2}$)	2,6	4,5	6,0	8,5
Tendencia del FR	decreciente en 2100	Estable 2100	Creciente	Creciente
Concentración de CO₂ en 2100 (ppm)	421	538	670	936

En el sexto IE-EE, emitido dentro del sexto informe de evaluación, se definen nuevos escenarios que se redefinen como **Rutas Socioeconómicas Compartidas** (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023). Las cinco SSPs se denominan SSP 1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 y describen futuras situaciones, para las próximas décadas, caracterizadas por unos determinados niveles de emisiones de GEI y, de manera concomitante, por el incremento de la temperatura global conforme a los posibles desarrollos de la humanidad en materia económica, social (grados de desigualdad), demográfica y tecnológica. Cada nuevo escenario exige una mayor o menor capacidad de mitigación y adaptación a esta nueva situación.

2.4.3. Modelos climáticos y bases de datos

Por su labor impulsando el avance de la climatología cabe mencionar, en primer lugar, el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP, por sus siglas en inglés), que se constituyó en 1980 bajo el auspicio del Consejo Internacional para la Ciencia y la Organización Meteorológica Mundial, al cual se adhirió, en 1993, la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, el Estudio y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés) con el propósito de coordinar la investigación climática internacional, estudiar el efecto de las actividades humanas en el clima y mejorar la previsibilidad de este. Su programa de estudios climáticos consta de seis subprogramas principales (*core programs*): Climate and Cryosphere (CliC); Climate and Ocean Variability, Predictability and Change (CLIVAR); Earth System Modelling and Observations (ESMO); Global Energy and Water Exchanges (GEWEX); Regional Information for Climate (RIFS) y Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate (SPARC).

El U.S. National Climate Data Center (NCDC) es un centro de investigación perteneciente a la U.S. National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA). Su programa climático es denominado Sistema Global de Predicción (Global Forecast System, GFS) e incluye el Navy Operational Global Atmospheric Prediction System (NOGAPS) y el Hurricane Weather Research and Forecast System (HWRF). El National Climatic Data Center (NCDC) de la Arizona State University y el Carbon Dioxide Information Analysis Center han creado el Global Historical Climatology Network (GHCN), version 3. Se trata de una base de datos de amplio uso que incluye datos históricos globales de temperatura, precipitaciones y presión atmosférica.

En Europa, la Agencia Europea de Medioambiente (EEA, por sus siglas en inglés) es responsable del Copernicus Climate Change Service (C3S) que, dentro del European Copernicus Program, gestiona la Climate Data Store (CDS) que proporciona información sobre el clima en Europa y muy en particular, sobre el cambio climático. Otras bases de datos y servicios de información climática a mencionar son, European Climate Assessment & Dataset Project, inscrito en la red EUMETNET o el UK National Meteorological Service (Met Office).

En la tabla 2.2 se citan algunas de las instituciones y consorcios que han desarrollado modelos climáticos globales usados por el IPCC para elaborar el AR6 y los correspondientes modelos climáticos diseñados por cada uno de ellos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021):

Tabla 2.2. Instituciones y modelos climáticos globales usados por el IPCC en la elaboración de sus informes.

Institución	Modelo climático
EC-Earth Consortium Europe	EC-Earth3-CC, EC-Earth3, EC-Earth3-LR Options: AerChem, Veg
UK National Meteorological service (Met Office) y U.K.'s Hadley Centre (MOHC)	3. HADGEM3-GC31-LL y HADGEM3-GC31-MM y UK-ESM1.0-LL
Climate Modelling Centre del Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL-CMC)	Federación de laboratorios fundada en 1995. IPSL Earth System Model, que incluye un modelo atmosférico robusto (LMDz) y los modelos INCA y REPROBUS de composición atmosférica. También ha elaborado el modelo oceánico NEMO y el modelo terrestre ORCHIDEE. Los modelos más recientes utilizados en el AR6 son IPSL-CM6A-LR e IPSL-CM5A2-INCA
Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici Italy (CMCC)	CMCC-CM2-SR5, y CMCC-ESM2
Centre National de Recherches Météorologiques France (CNRM) y Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS)	CNRM-CM6-1 y CNRM-CM6-1-HR
Max Planck Institute for Meteorology, Germany, (MPI-M)	MPI-ESM1-2-LR y MPI-ESM1-2-HR

NorESM Climate Modelling Consortium Norway (NCC)	NorCPM1, NorESM1-F, NorESM2-LM y NorESM2-MM
Consortium Switzerland, Germany, UK, Finland (HAMMOZ)	MPI-ESM-1-2-HAM
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory de la Princeton University Forrester (GFDL) en colaboración con NOAA	GFDL-CM4 y GFDL-ESM4
U.S. National Center for Atmospheric Research (NCAR)	CESM2, CESM2-FV2, CESM2-WACCM, CESM2-WACCM-FV2
NASA's Goddard Institute of Space Studies (GISS)	GISS-E2-1-G, GISS-E2-1-H, GISS-E2.1-G-CC y GISS-E2-2-G
U.S. University of Arizona	MCM-UA-1-0
National Laboratories Consortium USA (E3SM)	E3SM 1.0, E3SM-1-1 y E3SM-1-1-ECA
Consortium JAMSTEC, AORI, NIES, R-CCS, Japan (MIROC)	MIROC-ES2L, MIROC-ES2H y MIROC6
Department of Earth System Science, China, (THU)	CIESM
Institute for Numerical Mathematics Russian Federation (INM)	INM-CM4-8 y INM-CM5-0
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) y Austr. Res. Council Centre of Excellence for Climate System Science Australia (ARCCSS)	ACCESS-ESM1-5 y ACCESS-CM2

2.4.4. Predecibilidad

El objetivo de la elaboración de modelos climáticos es adquirir una capacidad predictiva que permita conocer con antelación el comportamiento de la atmósfera para acomodar la actividad humana a la evolución futura del clima evitando o minimizando el impacto de posibles fenómenos adversos. Pese a que se ha avanzado mucho en el último siglo, el hecho de que la atmósfera sea un sistema dinámico y altamente no lineal implica que puede experimentar una gran variabilidad evolutiva, dependiendo de las condiciones iniciales, e impone un límite a la predecibilidad. Esto obliga a incorporar sistemas de predicción probabilistas. El carácter caótico del sistema dinámico atmosférico y sus implicaciones para la predicción de su comportamiento se ilustran en la figura 2.10 en la que se muestra un vóxel dentro de la malla del modelo atmosférico cuyo estado, en un instante dado t_0 , viene dado por los valores concretos que adoptan las cinco variables:

presión (P), temperatura (T), humedad específica (h), componente zonal del viento (u) y componente meridional (v) del viento en ese punto de la malla. Los valores de esas cinco variables, correspondientes a todos los puntos de la malla en un instante dado de tiempo posterior (t_r), describirán el estado de la atmósfera en el dominio en estudio en ese instante según un modelo determinista (figura 2.10a).

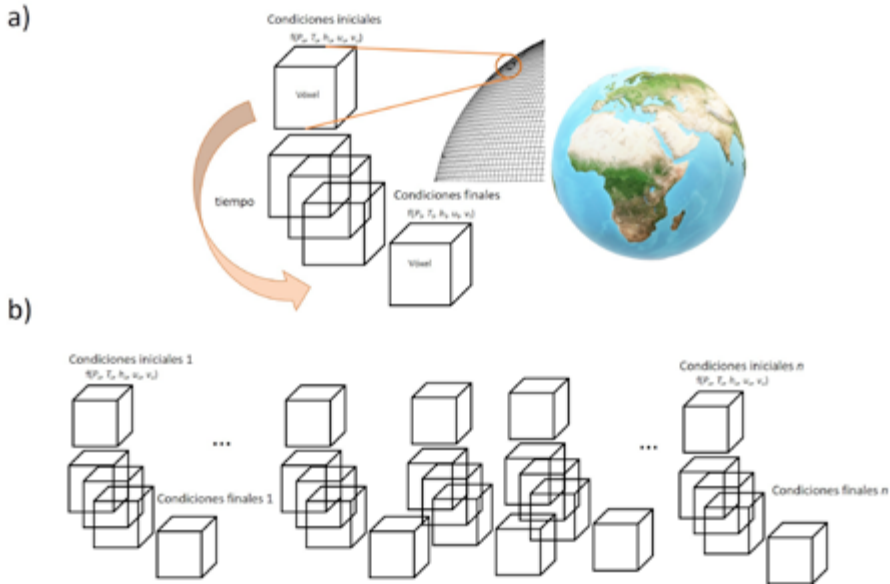


Figura 2.10. Esquema de la evolución de los estados atmosféricos: a) en un modelo determinista; b) en un modelo probabilista.

Sin embargo, el comportamiento caótico del sistema dinámico atmosférico hace que los modelos climáticos tengan un cierto grado de incertidumbre. Del mismo modo, existe una cierta incertidumbre en la determinación de las condiciones iniciales y de contorno, por lo que no existen estados de la atmósfera únicos para cada instante de tiempo sino una distribución de estados atmosféricos o conjunto de todos los estados atmosféricos posibles en cada instante, los cuales conforman el espacio de estados atmosféricos. Ello da lugar a un conjunto de posibles estados finales que se originarán a partir de cada uno de los diferentes estados iniciales, tal como muestra la figura 2.10b. La existencia de múltiples estados posibles de la atmósfera para cada instante de tiempo hace necesario adoptar un modelo probabilista de predicción que clasificaría los estados futuros de la atmósfera en función de su probabilidad de existencia (figura 2.11).

La **predecibilidad** se define como la probabilidad de que una predicción pueda tener un grado razonable de corrección o acierto. La predecibilidad disminuye a medida que el rango o intervalo de tiempo aumenta y ello hace que se puedan establecer dos criterios diferentes para evaluarla en un modelo climático concreto: predecibilidad de primera clase, para predicciones cotidianas a corto plazo (pronóstico del tiempo a unos días o semanas) y la predecibilidad de segunda clase, para plazos de tiempo largos, que se aplica a las proyecciones climáticas. Para realizar estimaciones de la predecibilidad de una predicción o proyección se ha ideado una técnica numérica denominada **sistema de predicción por**

conjuntos (EPS, por sus siglas en inglés). Esta técnica consiste en cuantificar la probabilidad de que un sistema climático evolucione siguiendo una determinada trayectoria estimada mediante un modelo climático, aplicando ciertas condiciones iniciales y de contorno. Este cálculo permite conocer cuál será la más probable de todas las evoluciones temporales del sistema climático que es posible simular con el modelo y, por tanto, aquella que, estadísticamente, más se aproxima a la evolución real. El Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (CEPPM) ha desarrollado un modelo de predicción por conjuntos para Europa (EC-ENS) (Santos Burguete *et al.*, 2020).

a)



b)

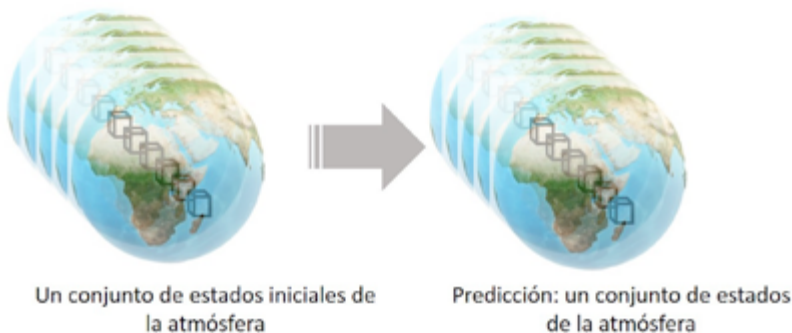


Figura 2.11. a) predicción realizada con un modelo determinista; b) predicción realizada con un modelo probabilista.

2.4.5. Incertidumbres

Las simulaciones del clima futuro obtenidas mediante las proyecciones climáticas, permiten comparar cómo será el impacto global del cambio climático en una región para cada una de las situaciones simuladas. Las incertidumbres que afectan a las proyecciones climáticas se producen en las diferentes etapas del proceso siguiendo un esquema en cascada en el que cada paso recibe las incertidumbres de los pasos anteriores (figura 2.12). Las fuentes de incertidumbre de las proyecciones pueden agruparse en tres clases:

- *Incertidumbre asociada al escenario:* surge del rango de posibles concentraciones futuras de los GEI y aerosoles en la atmósfera y de su influencia en el comportamiento de la biosfera y la hidrosfera. El incremento de emisión de gases de efecto invernadero es uno de los factores más preocupantes por su incidencia en el calentamiento global. Este efecto está sujeto a factores de influencia incierta de tipo socio-económico, demográfico, fuentes energéticas disponibles, consumo futuro de energía, etc. Para la inclusión de estas variables en los modelos climáticos el IPCC ha propuesto una colección de escenarios de evolución, como se describió en el apartado anterior. Otras fuentes altamente impredecibles, aunque menos probables, que deben ser incluidas en los modelos son ciertos forzamientos externos tales como la actividad solar o volcánica. A la incertidumbre asociada a las emisiones hay que añadir la incertidumbre asociada a cómo será la influencia de estas en la biosfera e hidrosfera. El ciclo del carbono no es, en estos momentos, perfectamente conocido. Por ejemplo, el papel desempeñado por la temperatura y el dióxido de carbono, responsables del establecimiento de ciertos equilibrios oceánicos implicados en el ciclo de carbono, es aún, desconocido dado que ambos factores son interdependientes. De continuar la tendencia actual, es muy plausible que su contribución relativa a la incertidumbre total sea la dominante hacia el final del siglo XXI.
- *Incertidumbre asociada a la modelización:* tiene su origen en el limitado conocimiento del sistema climático, tanto en la comprensión de este como en la capacidad para simularlo. Esta imperfección de los modelos obliga a realizar aproximaciones. También se incluyen aquí las incertidumbres asociadas a las condiciones iniciales y a la implementación de regionalizaciones (capítulo 3).
- *Incertidumbre asociada a la variabilidad natural:* está asociada a la variabilidad inherente del clima y de los agentes responsables de forzamientos. El forzamiento radiativo es un factor determinante de la distribución espacio-temporal de aerosoles. El conocimiento de este tiene gran importancia a escala regional debido a su heterogeneidad tanto en su aparición como en la respuesta producida. El uso del suelo en diferentes sectores socio-económicos como el hidrológico, agrícola, energético, e incluso turístico, es otro factor de interés que requiere ser considerado en el diseño de modelos a escala regional. Este factor resulta de complejo estudio debido a la baja relación de la señal de respuesta de los usos del suelo frente a la variabilidad climática y, en particular, a las precipitaciones. La contribución relativa de esta incertidumbre a la incertidumbre total debería decrecer con el tiempo a medida que la incertidumbre debida al escenario aumente.

Las tres fuentes de incertidumbre descritas presentan una evolución temporal similar a la incertidumbre global del planeta en los modelos climáticos regionales. Sin embargo, la incertidumbre debida a los modelos y la variabilidad interna natural exhiben un mayor valor en estos últimos ya que las fluctuaciones internas tienen mayor impacto a nivel regional.

La determinación del nivel de incertidumbre se realiza mediante la aplicación de aproximaciones probabilísticas, usando el EPS, con las que se exploran conjuntos representativos de métodos, modelos, condiciones, etc. De forma sencilla esta metodología

consiste en tomar el modelo climático, cuya eficacia predictiva desea conocerse, y efectuar simulaciones con un gran número de valores, ligeramente diferentes, de una determinada magnitud física. Posteriormente, las predicciones que proporciona el modelo en cada caso se comparan entre sí. La figura 2.13a muestra la predicción a diez días obtenida con el modelo desarrollado en el Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (CEPPM) tomando como dato una velocidad del viento de 3 m s^{-1} . Seguidamente se genera una nueva predicción modificando ligeramente el valor de velocidad del viento, por ejemplo, $3,3 \text{ m s}^{-1}$. Este proceso se repite un número elevado de veces, por ejemplo, cuarenta, obteniendo las correspondientes gráficas predictivas. Se procede del mismo modo con el resto de parámetros del modelo. Si las predicciones climáticas obtenidas difieren significativamente, el modelo no es útil (figura 2.13b). Si, por el contrario, las predicciones son similares, el modelo es admisible pues significa que, incluso modificando las condiciones, lo cual es habitual en la naturaleza, el modelo continúa ofreciendo una predicción aceptable (Windy Weather World, 2023). Este método se ha impuesto en las últimas décadas.



Figura 2.12. Esquema en cascada de las diferentes fuentes de incertidumbre. Adaptado de Rodríguez Camino *et al.*, 2020.

La incertidumbre relativa al diseño estructural del modelo climático, discretización de elementos del modelo tales como las ecuaciones, resolución espacial o criterios de parametrización, se averigua mediante simulaciones con diferentes modelos y esquemas de parametrizaciones. Otra fuente de incertidumbre se encuentra en las bases de datos observacionales atmosféricas y oceanográficas que poseen una capacidad y precisión de datos limitada (Mitchell y Hulme, 1999). Además, los resultados de las proyecciones presentan funciones de densidad de probabilidad para las variables climáticas no coincidentes con las obtenidas con los datos observados en el periodo de control, lo cual produce alteraciones estadísticas sistemáticas en relación a los valores esperados (Teutschbein y Seibert, 2013). Los sesgos inherentes a los modelos dificultan su aplicabilidad en estudios de impacto del cambio climático, por lo que se precisa la aplicación de métodos de corrección.

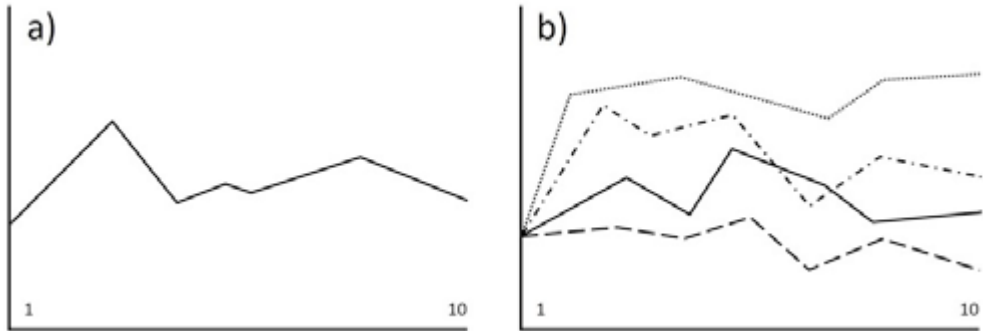


Figura 2.13. a) Previsión a diez días del clima con el modelo global del CEPPM; b) diversas predicciones modificando, por ejemplo, el valor de velocidad del viento ligeramente. Adaptado de Windy Weather World (2023).

2.5. Referencias

AEMET (2017) Guía de usuario: Escenarios-PNACC Datos mensuales. ANEXO Regionalización CORDEX. https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_mensuales?w= 0&v=WSS&e=HIST&p=Todos&f=Todos&b=1. [Consultado 18-05-2023].

Amblar Francés, P., Casado Calle, M.J., Pastor Saavedra, A., Ramos Calzado, P. y Rodríguez Camino, E. (2017) Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5. Ministerio de Agricultura Pesca, Alimentación y Medioambiente. Disponible en: https://www.aemet.es/es/conocerlas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/Guia_escenarios_AR5. [Consultado 23-04-2023].

Collins, M., Tett, S.F.B. y Cooper, C. (2001) "The internal climate variability of HadCM3, a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments", *Climate Dynamics*, 17 (1), pp. 61–81.

Collins, W.D., Rasch, P.J., Boville, B.a., Hack, J.J., Mcca, J.R., Williamson, D.L., Kiehl, J.T., Briegleb, B., Blitz, C., Zhang, M. y Dai, Y (2004). Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0). University Corporation for Atmospheric Research. Disponible en: <file:///Users/mariateresadomenech/Downloads/PDF%20Datastream.pdf>. [Consultado 3-05-2023].

Farmer, G.T. y Cook J. (2013) *Climate Change Science: A Modern Synthesis, Vol. 1-The Physical Climate*. Springer.

Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W. Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason C. y

Rummukainen M. (2013) "Evaluation of Climate Models". En: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex V. y Midgley P.M. Eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge y New York: Cambridge University Press,

Franchito, S.H. y Rao, V.B. (2015) "Studies of Climate Change with Statistical-Dynamical Models: A Review", *American Journal of Climate Change*, 04(01), pp. 57-68.

Gaertner, M.A., Gutiérrez, J.M. y Castro, M. (2012) Escenarios regionales de cambio climático, *Ref*, 26(2). Disponible en: <http://www.rsef.org>. [Consultado 16-04-2023].

Gates, W. L., Boyle, J., Covey, C., Dease, C., Doutriaux, C., Drach, R., Fiorino, M., Gleckler, P., Hnilo, J., Marlais, S., Phillips, T., Potter, G., Santer, B., Sperber, K., Taylor K. y Williams D. (1998) "An Overview of the Results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I)", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73, pp. 1962-1970.

Henderson-Sellers, A. y McGuffie, K. (1987) *A climate modelling primer*. New York: Wiley.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2000) Special Report. Emission scenarios. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/sres-en.pdf>. [Consultado 16-04-2023].

Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) Climate Change 2007. Working Group I: The Physical Science Basis. <https://www.archive.ipcc.ch>. [Consultado 3-05-2023].

Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) "AR5". En: Solomon, S., Qin, Manning, D.M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H. L. Eds. *Climate change 2007: The physical science basis*. New York: Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) AR6 Sixth Assessment Report. Synthesis Report. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/press/IPCC_AR6_SYR_SlideDeck.pdf. [Consultado 3-05-2023].

Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) "Annex II: Models". Gutiérrez, J.M. y A.-M. Tréguier Eds. En: Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. y Zhou B. Eds. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Masson- Cambridge y New York: University Press, pp. 2087–2138, Disponible en: <http://10.1017/9781009157896.016>. [Consultado 3-05-2023].

Kleidon, A. y Lorenz, R.D. (2004) *Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy: Life, Earth, and Beyond*. Springer.

Mitchell, T.D. y Hulme, M. (1999) "Predicting regional climate change: living with uncertainty", *Progress in Physical Geography*, 23(1), pp.57-78.

North, G.R. y Stevens, M. J. (2006) "Energy-balance climate models". En: Kiehl, J.T. y Ramanathan, V. Eds. *Frontiers of Climate Modeling*. Cambridge: Cambridge University Press, pp.52-72.

Ramanathan, V. y Coakley, J.A. Jr. (1978) "Modeling Through Radiative-Convective Models", *Reviews in Geophysics and Space Physics*, 16(4), pp.465-489.

Rodríguez Camino, E., Parodi Perdomo, J.A., González Rouco, F. y Montoya Redondo, M. (2020) “Proyecciones climáticas”. En: *Física del caos en la predicción meteorológica*. AEMET. Disponible en: https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/Fisica_del_caos_en_la_predicc_meteo. [Consultado 16-04-2023].

Rood, R.B. (2019) “Validation of Climatic Models: An Essential Practice”. En: Birta, L.G. y Saam, N.J. Eds. *Computer Simulation Validation. Fundamental Concepts, Methodological Frameworks, and Philosophical Perspectives*. Springer, pp. 737-762.

Rose, B.E.J. (n.d.) The Climate system and climate models. Disponible en: <https://brian-rose.github.io/ClimateLaboratoryBook/courseware/climate-system-models.html>. [Consultado 16-04-2023].

Santos Burguete (2020) “Predecibilidad”. En: Santos Burguete, C. Ed. *Física del caos en la predicción meteorológica*. AEMET, pp. 207-240. Disponible en: https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/Fisica_del_caos_en_la_predicc_meteo. [Consultado 16-04-2023].

Santos Burguete, C. y Pastor Saavedra, M.A. (2020) “Verificación probabilista”. En: Santos Burguete, C. Ed. *Física del caos en la predicción meteorológica*. AEMET, pp. 207-240. Disponible en: https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/Fisica_del_caos_en_la_predicc_meteo. [Consultado 16-04-2023].

Schlesinger, M.E. (2007) *Human-Induced Climate Change: An Interdisciplinary Assessment*, Cambridge: Cambridge University Press.

Schlünzen, K.H. (2019) “Standards for Evaluation of Atmospheric Models in Environmental Meteorology”. En: Birta, L.G. y Saam, N.J. Eds. *Computer Simulation Validation. Fundamental Concepts, Methodological Frameworks, and Philosophical Perspectives*. Springer, pp. 563-586.

Stott, P.A., Tett, S.F.B., Jones, G.S., Allen, M.R., Ingram, W.J. y Mitchell, J.F.B. (2001) “Attribution of Twentieth Century Temperature Change to Natural and Anthropogenic Causes”, *Climate Dynamics*, 17, pp. 1-22.

Seinfeld, J.H. y Pandis, S.N. (2006) *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, 2ª ed. New York: John Wiley and Sons, Inc.

Stensrud, D.J. y Yussouf, N. (2007) “Reliable probabilistic quantitative precipitation forecasts from a short-range ensemble forecasting system”, *Weather and Forecasting*, 22, pp.3-17.

Teutschbein, C. y Seibert, J. (2013) “Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions?”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, pp.5061–5077.

Theis, S. y Baldauf, M. (2019) “Validation in Weather Forecasting”. En: Birta, L.G. y Saam, N.J. Eds. *Computer Simulation Validation. Fundamental Concepts, Methodological Frameworks, and Philosophical Perspectives*. Springer, pp. 711-736.

VDI (2017a) VDI 3783 Part 7: Environmental meteorology-Prognostic mesoscale wind field models–Evaluation for dynamically and thermodynamically induced flow fields. Beuth-Verlag. Disponible en: <https://www.beuth.de/en/technical-rule/vdi-3783-blatt-7/267500583>. [Consultado 16-04-2023].

VDI (2017b) VDI 3783 Part 9: Environmental meteorology-Prognostic microscale wind field models-Evaluation for flow around buildings and obstacles. Beuth-Verlag. Disponible en: <https://www.beuth.de/en/technical-rule/vdi-3783-blatt-9/267500591>. [Consultado 16-04-2023].

Walker, J.C.G., (1991) *Numerical Adventures with Geochemical Cycles*. Oxford: Oxford University Press.

Wilks, D.S. (2011) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, pp. 676.

Worsley, T.R. y Kidder, D.L. (1991) "First-order coupling of paleogeography and CO₂, with global surface temperature and its latitudinal contrast", *Geology*, 19(12), pp.1161-1164

Windy Weather World (2023) What are ensemble models and how to use them for weather forecasting. Windy Weather World Inc. Disponible en: <https://windy.app/blog/how-to-use-ensemble-models-for-weather-forecast.html>. [Consultado 16-04-2023].

Xue, Y. y Fennessey, M.J. (1996) "Impact of vegetation properties on U.S. summer weather prediction", *Journal of Geophysical Research*, 101 (D3), pp.7419.

2.6. Bibliografía

Asociación Española de Climatología (2014) Cambio Climático y Cambio Global. Serie A, 9, Madrid: Asociación Española de Climatología (AEC).

Mann, M.E., Bradley, R.S. y Hughes, M.K. (1998) "Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries", *Nature*, 392 (6678), pp.779–787.

Santos Burguete, C. Ed. (2020) *Física del caos en la predicción meteorológica*. AEMET. Disponible en: https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/Fisica_del_caos_en_la_predicc_meteo. [Consultado 16-04-2023].

Solomon, S., Qin, Manning, D.M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. y Miller, H. L. Eds. (2013) *The physical science basis*. New York: Cambridge University Press.

Capítulo 3:

Regionalización de modelos climáticos

Contenidos

- 3.1. Regionalización de modelos climáticos
 - 3.1.1. Regionalización dinámica
 - 3.1.2. Regionalización estadística
- 3.2. Programas europeos de modelado de climas regionales
- 3.3. Programa español de generación de proyecciones climáticas
- 3.4. Escenarios regionales de cambio climático para la península ibérica
- 3.5. Referencias
- 3.6. Bibliografía

La aplicación más importante de las proyecciones climáticas es la evaluación del impacto que el cambio climático tendrá en una determinada zona o región del planeta. El método más habitual para ello consiste en tomar un modelo teórico de un determinado proceso, por ejemplo, un modelo hidrológico de avenidas, e introducirle las proyecciones de variables climáticas seleccionadas como datos de entrada. Sin embargo, las series temporales de variables que suministran las proyecciones climáticas que simulan el comportamiento dinámico de la atmósfera, generadas mediante modelos de circulación general (GCMs, por sus siglas en inglés), tienen una resolución muy baja, lo que las hace inapropiadas para utilizarse en estudios de impacto a escala regional. Para solventar este inconveniente y obtener una mayor resolución, se utilizan técnicas de regionalización (*downscaling*).

Los modelos regionalizados son modelos climáticos adaptados a una región o localización geográfica concreta cuya principal característica es la mayor resolución en relación a los GCMs. Esto los convierten en modelos idóneos para elaborar escenarios climáticos que constituyen la base de los estudios de impacto y vulnerabilidad. Los escenarios climáticos también se aplican en la evaluación de la eficacia de programas de adaptación al cambio climático en el ámbito económico, social, cultural y de la protección medioambiental. Diversos organismos internacionales e instituciones nacionales y regionales en todo el mundo desarrollan este tipo de estimaciones. A nivel nacional, la

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) es la principal institución encargada de realizar la actividad relativa al modelado regional. En este capítulo se lleva a cabo una revisión de la metodología utilizada para elaborar un modelo climático regional y las características más relevantes de estos modelos.

3.1. Regionalización de modelos climáticos

Los GCMs y los modelos de sistema terrestre (ESMs, por sus siglas en inglés) proporcionan una imagen global del clima de la Tierra, pero los datos que proporcionan, por ejemplo, calentamiento diferencial para diferentes latitudes y épocas del año, carecen de la resolución necesaria para evaluar la incidencia que el cambio climático tendrá en el futuro en el clima de una región del planeta de tamaño limitado como es la Comunitat Valenciana¹.

Una solución a este inconveniente consistiría en aumentar la resolución del GCM. Sin embargo, ello requeriría un gran incremento del cálculo computacional y también una adaptación de las parametrizaciones físicas a esa mayor resolución lo cual es, en principio, bastante costoso. La alternativa para abordar este problema consiste en desarrollar modelos climáticos regionales adaptados a la fisiografía y a la menor extensión geográfica de la localización o región en estudio, de modo que los modelos proporcionen, de manera directa, los datos de entrada para las aplicaciones para las que fueron diseñados. Estos modelos se obtienen aplicando otra clase de aproximaciones a partir de las simulaciones con GCMs, conocidas como técnicas de regionalización, que se desarrollaron en la última década del siglo XX. En el proceso de regionalización se genera nueva información de suma utilidad. Se “rellenan huecos”, es decir, se incorpora información que no aparece en la malla de los GCMs. Mediante la **regionalización** el clima es descrito con un nivel de detalle a escala regional, que suele oscilar entre 10 y 100 km. Modelos como el HARMONIE-AROME, desarrollado por AEMET, consiguen aumentar notablemente la resolución hasta valores de 2 km o incluso inferiores al km (Calvo Sánchez, 2020). Debido a que la variabilidad natural del clima es menor en la gran escala, o escala global (100-150 km) que en las escalas regionales y locales, los resultados obtenidos por regionalización estarán sometidos a una mayor incertidumbre que los procedentes directamente de los GCMs.

En paralelo a las técnicas de regionalización, existen otros procesos menos frecuentemente utilizados en climatología. La **ampliación de escala** (*upscaling*) proporciona información sobre la influencia que tienen los cambios en el clima a escala local/regional sobre el clima a gran escala. Los **procesos umbral** (*tipping points*) dan cuenta de escenarios de baja probabilidad que, aunque poco plausibles, deben ser tenidos en cuenta cuando se efectúa una evaluación de riesgos de patrimonio cultural.

3.1.1. Regionalización dinámica

La **regionalización dinámica** consiste en aplicar modelos regionales de clima. Esta técnica utiliza las relaciones físicas y dinámicas entre el clima a gran escala y los procesos físicos que tienen lugar a nivel regional o local. Los **modelos climáticos regionales** o de área limitada (RCMs, por sus siglas en inglés) son modelos climáticos de la atmosférica

¹ Estos modelos tienen una resolución de 200-300 km, aunque algunos modelos como el ECHRES diseñado en el Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo pueden alcanzar una resolución horizontal de 9 km.

correspondientes a un área limitada de la Tierra que se discretiza espacialmente con vóxeles de menor tamaño, por lo que el RCM posee mayor resolución que un GCM. Cuanto menor tamaño tengan los fenómenos climáticos a estudiar, mayor será la resolución exigida al modelo regional. En los RCMs los valores iniciales de las variables y su evolución temporal en los contornos del dominio se derivan de resultados obtenidos de GCMs. Se dice, entonces, que el RCM está anidado en el GCM y a este proceso se denomina **anidamiento** (*dynamic downscaling*). El resto de datos se obtiene de manera independiente a partir de observaciones locales tales como los datos proporcionados por radares. El proceso de anidamiento puede repetirse, generándose una cadena de dos o más anidamientos en la que la escala de trabajo se va reduciendo de modelo en modelo. Pese a que el dominio espacial es muy inferior en un RCM en comparación con un GCM, el cual abarca todo el planeta, el tiempo de computación requerido para simular un mismo periodo es muy superior. Por ello, en la práctica, el tamaño de vóxel de la malla del RCM se fija alcanzando un compromiso entre la potencia de computación disponible y la escala de los procesos atmosféricos con mayor influencia sobre el clima de la región.

Para conocer el grado de incertidumbre del modelo, en la técnica de regionalización dinámica se procede operando con conjuntos (*ensembles*) multimodelo de simulaciones. Para ello se realizan simulaciones de características comunes con diversos RCMs, por ejemplo, simulaciones de anidamiento de distintos RCMs en un mismo GCM, para un mismo escenario. Las diferencias en los resultados obtenidos entre los miembros del conjunto son un indicador de la incertidumbre coligada a la formulación de los RCMs. Si los distintos RCMs proporcionan cambios de variables climáticas muy dispares se considera que hay una gran incertidumbre.

Los RCMs, proporcionan previsiones físicamente muy consistentes. Como principal ventaja, este sistema de trabajo ofrece una muy buena representación de las retroalimentaciones derivadas de la variación de concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI). Además, se pueden obtener regionalizaciones de todas las variables que generan los RCMs. Otra característica distintiva de la regionalización dinámica es su capacidad para detectar fenómenos extremos producidos en situaciones meteorológicas excepcionales. Sus mayores inconvenientes son el requerimiento de un gran aparato de cálculo numérico y la propagación de incertidumbres desde los modelos globales de los que derivan.

Para la elaboración de proyecciones regionalizadas por métodos dinámicos, en el marco del proyecto CORDEX, se han utilizado los siguientes RCMs y GCMs en el dominio EURO-CORDEX (EUR-11) (Tabla 3.1) (Amblar Francés, 2017):

Tabla 3.1. RCMs y GCMs en el dominio EURO-CORDEX (EUR-11).

Institución	MCR	MCG
Climate Limited-area Modelling Community, CLM-Community	CCLM4-8-17	CNRM-CM5
Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rosaby Centre, Suecia	RCA4	CNRM-CM5 IPSL-CM5A-MR MPI-ESM-LR MOHC- HadGEM2-ES

Royal Netherlands Meteorological Institute, Holanda	RACMO22E	EC-EARTH MOHC- HadGEM2-ES
Climate Limited-area Modelling Community (CLM-Community)	CCLM4-8-17	MPI-ESM-LR
Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center, Max Planck Institute for Meteorology, Alemania	REMO2009	MPI-ESM-LR
Climate Limited-area Modelling Community (CLM-Community)	CCLM4-8-17	MOHC- HadGEM2-ES

Siguiendo el criterio de Amblar Francés *et al.* (2017), a continuación, se indican los modelos climáticos más importantes usados por AEMET para llevar a cabo regionalizaciones dinámicas (tabla 3.2):

Tabla 3.2. Modelos climáticos más importantes usados por AEMET para llevar a cabo regionalizaciones dinámicas.

Institución	Modelo
Commonwealth Scientific and Industrial Research Org. (CSIRO) y Bureau of Meteorology (BoM), Australia	ACCESS1.0 ACCESS1.3
CSIRO in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence (QCCCE), Australia	CSIRO-Mk3.6.0
Beijing Climate Center, China	Bcc-csm1.m
College of Global Change and Earth System Science (GCESS) Beijing Normal University, China	BNU-ESM
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Canadá	CanESM2
Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (CMCC), Italia	CMCC-CESM CMCC-CM CMCC-CMS
Centre National de Recherches Météorologiques/Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS), Francia	CNRM-CM5
Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), Francia	IPSL-CM5A-LR IPSL- CM5A-MR, IPSL-CM5B- LR
NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA	GFDL-ESM2G GFDL- ESM2M

Met Office, Reino Unido	HadGEM2-CC
Institute of Numerical Mathematics, Rusia	Inm-cm4
Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI) National Institute for Environmental Studies (NIES) JAMSTEC, Japón.	MIROC5, MIROC-ESM MIROC-ESM-CHEM
Meteorological Research Institute, Japón	MRI-CGCM3
Max-Planck-Institut (MPI) for Meteorology, Alemania	MPI-ESM-LR MPI-ESM-MR

3.1.2. Regionalización estadística

La **regionalización estadística** (*statistical downscaling*) se basa en el establecimiento de semejanzas entre los valores teóricos de las variables atmosféricas (generalmente se opera con temperatura y precipitaciones) obtenidos con los modelos a gran escala y los valores reales de datos observados. Para ello se aplican técnicas estadísticas que relacionan de forma empírica las variables de los GCMs con las variables regionales observadas en superficie (IPCC, 2001). Estas técnicas estadísticas incluyen algoritmos muy variados que comprenden métodos de clasificación, modelos de regresión² y generadores de tiempo. Los modelos a escala regional, así obtenidos, se ajustan o calibran con datos de registros históricos de observaciones para un cierto período de referencia o de reanálisis.

La ventaja principal de estas técnicas es que se sirven de datos reales de las variables, medidos durante el período de referencia, lo que permite corregir estadísticamente los desajustes y deficiencias sistemáticos. Otra gran prerrogativa de las técnicas de regionalización estadísticas es el menor requerimiento de cálculo computacional con respecto a la regionalización dinámica. Ello posibilita la realización de un gran número de simulaciones con diferentes procedimientos y distintos GCMs, lo cual permite detectar separadamente las posibles fuentes de incertidumbre asociadas a escenarios, GCMs, y a la propia técnica de regionalización.

Por otra parte, se asume un carácter estacionario para los modelos elaborados, esto es, que las relaciones entre ambos tipos de variables teóricas y observacionales (predictores y predictandos) no variarán en el futuro. Esto constituye una de sus principales limitaciones ya que la conexión de las variables es estable en el periodo de control de los modelos, pero no lo es en el futuro. Otra limitación se debe a la escasa fiabilidad de este método para representar sucesos extremos.

Las regionalizaciones estadísticas se suelen clasificar en tres grandes grupos (Ambral Francés *et al.*, 2017; Gaertner *et al.*, 2012):

- *Funciones de transferencia.* Básicamente son métodos generativos que utilizan modelos estadísticos de regresión lineal o no lineal que permiten inferir las re-

² Por ejemplo, el método kriging en el que se tiene en cuenta el carácter estocástico de los datos usando una función variograma-paramétrica para modelar la correlación espacial (Herrera *et al.*, 2012).

laciones entre los predictandos a escala regional y los predictores a gran escala. También se utilizan otros métodos de estadística inferencial como el análisis por componentes principales, para reducir la dimensión del problema, o el análisis de correlación canónica lineal o no lineal, para predecir con patrones correlacionados. AEMET utiliza un método basado en técnicas de regresión lineal múltiple. Esta técnica se ejecuta en tres pasos: a) selección de predictores, b) generación del modelo de regresión y c) validación y aplicación del modelo. Se aplica en zonas con orografía compleja

- *Tipos de tiempo y métodos de análogos.* Son técnicas no generativas que utilizan algoritmos de vecinos cercanos (k-NN) que aplican con una preclasificación, bien en tipos de tiempo o bien en un número finito de grupos, conforme a la similitud a gran escala de los campos atmosféricos; Destaca, entre las de esta clase, la **técnica de análogos**, en la que la proyección climática se obtiene reconociendo días del pasado similares a los días futuros (Petisco de Lara, 2008). El método utilizado por AEMET se basa en el establecimiento de análogos en series históricas de datos observados con los valores proporcionados por el modelo en un cierto paso de tiempo. Ello hace necesario disponer de series históricas de datos suficientemente extensas para que se puedan encontrar análogos con el suficiente grado de similitud (por ejemplo, la distancia euclídea al cuadrado de los campos utilizados). Una de las principales limitaciones de esta técnica es la escasa aplicabilidad en el campo de los valores extremos, al no disponer habitualmente de series históricas suficientemente largas. Operativamente esta técnica conlleva tres fases: a) clasificación sinóptica de situaciones atmosféricas; b) selección de predictores para cada variable, clase y punto de observación; y c) obtención de las proyecciones.
- *Generadores de tiempo.* Son técnica de desagregación temporal, esto es, esquemas estadísticos que implican generadores estocásticos de secuencias meteorológicas que se utilizan cuando se dispone de predicciones a una escala temporal mayor. De este modo, a partir de valores mensuales, por ejemplo, se simulan valores diarios. Estos métodos permiten generar múltiples realizaciones en el modelo.

3.2. Programas europeos de modelado de climas regionales

El Programa para el Modelado Integrado del Sistema Terrestre (PRISM, por sus siglas en inglés) ha sido un proyecto de cooperación europeo, desarrollado entre 2001 y 2004, que ha proporcionado a la comunidad científica europea sistemas terrestres de observación y captación de datos y una plataforma común de *software*. OASIS (Ocean Atmosphere Sea Ice Soil) PRISM es un sistema con componentes intercambiables que le proporcionan una estructura flexible. Incluye todo tipo de modelos componentes: regionales, atmosféricos, de la química atmosférica, de la superficie terrestre, del océano, del mar-hielo y de biogeoquímica oceánica, lo que permite el intercambio de información a través de las interfaces habituales. De este modo, se ha conseguido un sistema muy eficiente por sus bajos costes de mantenimiento y alta flexibilidad. Además, es un sistema portable ya que posibilita el funcionamiento de los modelos en distintas plataformas. El acoplador OASIS4

es un *software* que permite el intercambio sincronizado (acoplamiento) de información entre los modelos numéricos de los distintos componentes. Esta es constituido por un paralelo central ejecutable que extrae la información entrante en archivos XML y la gestiona mediante un proceso de simulación acoplada. Cada aplicación de este *software* alberga varios modelos de componentes climáticos que, para interactuar entre sí durante el funcionamiento, se conectan con la biblioteca de interfaz de modelos del sistema OASIS PRISM (PSMILe, PRISM System Model Interface Library). OASIS-PSMILe permite efectuar búsquedas paralelas de vecindarios mediante un algoritmo de múltiples redes que resuelve el problema del acoplamiento entre las redes fuente y destino (European Climate Adaptation Platform Climate, 2009).

Los proyectos PRUDENCE, STARDEX y MICE, que seguidamente se describen, han constituido un *cluster* cooperativo de proyectos europeos para predecir eventos extremos derivados del cambio climático (Ministerio de Medio Ambiente, 2006).

El proyecto PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects), adscrito al V Programa Marco de la Unión Europea, se desarrolló entre 2001 y 2004 y estuvo dirigido a identificar las incertidumbres de los modelos regionales de clima con mallas de 50 km para regionalizar las salidas de los GCMs. Un resultado relevante de este proyecto fue una base de datos que incluye promedios mensuales de nueve modelos anidados a partir de un único CGM (HadAM3) de la península ibérica. A partir de estos datos es posible suministrar información en puntos de la malla en la península ibérica y utilizar la técnica “ensemble” para reducir y compensar errores. La base de datos PRUDENCE almacena datos diarios de simulaciones climáticas para el periodo 2070-2100, incluyendo también datos del ciclo del agua (precipitación, evapotranspiración, escorrentía, humedad del suelo). En este proyecto también se efectúan regionalizaciones a partir de diferentes modelos globales (ECHAM4/OPYC, ECHAM5, ARPEGE/OPA). Las primeras proyecciones obtenidas mediante regionalización dinámica que realizó AEMET fueron obtenidas con el proyecto europeo PRUDENCE. En el marco de este proyecto, la Universidad de Castilla-La Mancha desarrolló el modelo PROMES en el que se realizaron tres simulaciones anidadas en el modelo global HadAM3 que abarcaban periodos de 30 años (Gaertner *et al.*, 2012).

El proyecto STARDEX (Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions), adscrito al V Programa Marco de la Unión Europea, estuvo dirigido a la comparación y evaluación de métodos estadísticos que permitiesen la elaboración de escenarios futuros de extremos para regiones de estudio europeas en el periodo 2070-2100.

El proyecto MICE (Modelling the Impact of Climate Extremes), también adscrito al V Programa Marco de la Unión Europea, permitió identificar y catalogar extremos de datos observados y teóricos calculados a partir de modelos climáticos. También evaluó escenarios futuros utilizando teorías de valores extremos y el impacto de los cambios en los extremos.

Otro estudio europeo de referencia es el proyecto ENSEMBLES, adscrito al VI Programa Marco de la UE, que se desarrolló entre los años 2005-2009. Con la misión de elaborar métodos de predicción probabilística por conjuntos del cambio climático, su objetivo específico fue acotar las incertidumbres en las predicciones seculares de cambio climático

mediante integraciones con diferentes condiciones de emisión, modelos globales y regionales, así como técnicas estadísticas de regionalización. En este proyecto se establecieron métodos estadísticos bayesianos de pesado y de combinación para unificar los distintos resultados en una predicción probabilística más robusta.

El Modelo Europeo del Sistema Tierra EC-Earth está incluido en el Quinto Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (MIP5). Este proyecto está siendo desarrollado por un consorcio europeo formado por once servicios meteorológicos nacionales europeos en colaboración con otras instituciones europeas. Basado en el sistema de predicción estacional del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (CEPPM)³, permitirá realizar predicciones a escalas decadal y secular. En este modelo, acoplado al modelo extendido de circulación general océano-atmósfera, se han incorporado módulos de hielos marinos, de química atmosférica y de vegetación interactiva. EC-Earth pretende ser un modelo predictivo válido en cualquier escala temporal.

El modelo EC-ENS es un modelo climático probabilístico generado con el método de predicción por conjuntos en el CEPPM. La predicción mensual se obtiene modificando ligeramente las condiciones iniciales cincuenta y una veces. Además, se genera una predicción, denominada “predicción de control”, que se aplica al sistema de análisis operacional para el océano y la atmósfera del CEPPM. De este modo, se puede generar una amplia variedad de escenarios climáticos futuros. Las principales características de este modelo son (Windy Weather World, 2023):

- Resoluciones espaciales en el rango 10-50 km en terrenos planos y entre 1-5 km en terrenos montañosos.
- El alcance del modelo es de 3 horas, con actualizaciones cada 6 horas.
- El recorrido es de 6 días.

El programa CORDEX, incluido en el Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP, por sus siglas en inglés) en el año 2009, ha favorecido notablemente el avance en los procesos de regionalización. Este programa incluye tres líneas: i) desarrollo de estructuras para la evaluación de técnicas de regionalización; ii) mejora de técnicas de regionalización, tanto estadísticas como dinámicas; y iii) promoción de la cooperación entre la comunidad de modelización climática y los usuarios finales de la información climática. Este proyecto posee una rama europea, EUROCORDEX, que combina los modelos regionales y globales de CORDEX correspondientes al dominio EURO-CORDEX (EUR-11) utilizado en proyecciones regionalizadas por métodos dinámicos.

3.3. Programa nacional de generación de proyecciones climáticas

Uno de los objetivos del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) es la generación de escenarios climáticos regionalizados para la geografía española. Esto incluye la descripción de los cambios esperables en el clima a lo largo del siglo XXI a partir de proyecciones climáticas y la identificación de las incertidumbres asociadas, su evaluación y su acotación. Más específicamente, el desarrollo de: (i) métodos de regionalización estadísticos a partir de modelos globales acoplados océano-atmósfera incluidos en ARA4

³ El CEPPM proporciona predicciones meteorológicas operacionales, reanálisis climáticos y conjuntos de datos específicos para múltiples aplicaciones. El conjunto de predicciones que produce el CEPPM permiten saber cómo evolucionará el clima en términos probabilísticos en un rango de futuros escenarios.

y otros proyectos internacionales tales como ENSEMBLES; (ii) métodos de regionalización dinámicos de modelos climáticos globales como el RCA desarrollado por el Centro Rossby (Suecia) basado en el modelo numérico HIRLAM. Otro objetivo específico, paralelo a los anteriores, es la generación de escenarios generalizados oceánicos descritos mediante oleaje, residuos del nivel del mar, corrientes o salinidad. En este plan nacional participan un gran número de grupos de investigación adscritos a diversas instituciones, entre las cuales destaca AEMET por su relevante papel (Fernández *et al.*, 2017).

La red temática CLIVAR-España promueve y coordina la contribución española al programa mundial CLIVAR cuyos objetivos son:

*“*Describir los procesos físicos responsables de la variabilidad climática a escala estacional, anual, interanual, decadal y secular, mediante la obtención y análisis de observaciones y el desarrollo y aplicación de modelos del sistema climático.*

** Extender el registro de variabilidad climática a lo largo de las escalas de interés, mediante la recolección de datos instrumentales y paleoclimáticos de calidad verificada.*

** Extender el rango y la fiabilidad de las predicciones climáticas a escala estacional e interanual, mediante la mejora de modelos de clima global y regional.*

** Comprender y predecir la respuesta del sistema climático al aumento en la concentración de gases de efecto invernadero y aerosoles, y comparar estas predicciones con el registro climático observado para detectar cualquier modificación antropogénica de la señal climática natural” (CLIVAR, 2023).*

3.4. Escenarios regionales de cambio climático para la península ibérica

A nivel internacional, la Federación Earth System Grid ha venido proporcionando acceso estandarizado a datos de salida de modelos de cambio climático de última generación (CMIP5 y CORDEX).

En la presente investigación se han utilizado los datos disponibles en las bases de datos de AEMET que han sido obtenidos en el marco del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) (Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medioambiente, 2017). Se trata de una colección actualizada de proyecciones regionalizadas de cambio climático para España denominada **Escenarios PNACC-Datos mensuales**⁴ que se consideran escenarios de referencia del PNACC. Esta base de datos se ha construido a partir de distintas metodologías de regionalización. Los Escenarios-PNACC constituyen una base de datos de temperatura, precipitación y otros índices derivados, basada en las proyecciones CMIP3 a escala europea que han sido obtenidas mediante métodos de regionalización estadísticos en el proyecto ENSEMBLES, con la contribución de AEMET. También se incorporaron en esta base de datos los resultados de los proyectos ESCENA y ESTCENA⁵ de regionalización dinámica y estadística, respectivamente. Los escenarios de regionalización estadísticos se produjeron mediante técnicas basadas en análogos y métodos de regresión. Para obtener este conjunto de datos se han utilizado los escenarios de emisiones de GEI B1, A1B y A2 del AR4. Las bases de datos observacionales proceden de AEMET y las observaciones en rejilla proceden del proyecto Spain02 v2.1 (malla regular con resolución de 20 km). Los

⁴ La denominación “escenario” no debe confundirse con los escenarios elaborados por el IPCC, aquí se hace alusión a proyecciones climáticas obtenidas en el marco de escenarios IPCC.

⁵ ESCENA y ESTCENA son dos proyectos o acciones estratégicas adscritos al Plan Nacional I+D+i 2008-2011.

datos de la base de datos Escenarios-PNACC se presentan en formato ASCII con extensión 'csv'. Cada fila corresponde a una fecha y cada columna a un punto de rejilla o a una localidad. En el formato GIS, se presentan con un fichero para cada mes y año en formato "ASCII grid ARCGIS" (Brunet *et al.*, 2008).

En la tabla 3.3 se resumen los proyectos que han constituido las fuentes de dicha base de datos (AEMET, 2015).

Tabla 3.3. Características de la base de datos Escenarios PNACC-Datos mensuales (AEMET, 2015).

Fuente	Institución	Descripción
Proyecto CORDEX (COordinated Regional Downscaling EXperiment)	Instituciones internacionales coordinadas en un marco común	
ESCENA, de regionalización dinámica	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico	Plan Nacional de I+D+i 2008-11
ESTCENA, de regionalización estadística	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico	Plan Nacional de I+D+i 2008-11
Proyectos de regionalización de AEMET	AEMET	
Proyecto ENSEMBLES	EU Commission	6º Programa Marco de I+D

Los modelos de circulación general utilizados en los anteriores proyectos para efectuar las regionalizaciones se resumen en la tabla 3.4 (AEMET, 2015).

Tabla 3.4. Modelos de Circulación General utilizados en la base de datos Escenarios PNACC-Datos mensuales.

Modelo	Institución	Tipo de Regionalización
ECHAM5	Max-Planck-Institut für Meteorologie, Alemania	Dinámica y estadística
CNRM-CM3	National Center for Meteorological Research, Francia	Dinámica y estadística
HadCM3	Mett Office UK	Dinámica y estadística
BCM2	Bjerknes Centre for Climate Research, Noruega	Estadística

Los modelos regionales utilizados en el proyecto ENSEMBLES se resumen en la tabla 3.5 (AEMET, 2015).

Tabla 3.5. Modelos regionales del proyecto ENSEMBLES.

Modelo	Institución
RM4.5	Centre National de Recherches Meteorologiques
HIRHAM5	Danish Meteorological Institute
CLM	Swiss Institute of Technology
HadRM3	Hadley Center/UK Met Office
RACMO2	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
RegCM3	Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics
HIRHAM	The Norwegian Meteorological Institute
REMO	Max Planck Institute for Meteorology
RCA3.0	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
PROMES	Universidad de Castilla la Mancha

La tabla 3.6 muestra las características específicas de los modelos regionales seleccionados por el IPCC-AR4 y el proyecto ENSEMBLES (AEMET, 2015).

Tabla 3.6. Características específicas de los modelos regionales seleccionados por el IPCC-AR4 y el proyecto ENSEMBLES (AEMET, 2015).

Acrónimo	Atmósfera	Resolución	Niv.	Océano	Resolución	Niv.
ECHAM5	ECHAM5	1.875°	31	MPI-OM	1.5°	40
CNCR-CM3	ARPEGE	V32.8°	45	OPA8.1	0.5x2°	31
HadCM3Q3 HadCM3Q0 HadCM3Q16	HadAM	2.75x3.75°	19	HadGOM1	1.25°	20
BCM21	ARPEGE V3	2.8°	31	MICOM2.8	2.4°	35
HadGEM21	HadGAM1	1.25x1.875°	38	HadGOM1	0.33x1°	40

Los datos contenidos en la base de datos Escenarios PNA-CC-Datos abarcan la península ibérica y las islas Baleares. Son acumulados mensuales que se presentan distribuidos en rejilla elaborada en el proyecto Spain 027, es decir, una cuadrícula común y homogénea con una resolución de 20 km (0,2°). Esta rejilla contiene datos obtenidos a partir de una red densa de 2.500 estaciones de AEMET entre 1950 y 2008.

3.5. Referencias

Adaptation Platform Climate (ADAPT) (2009) ENSEMBLE final report. Disponible en: <https://climate-EuropeanClimateadapt.eea.europa.eu/en/metadata/publications/ensembles-final-report>. [Consultado 16-04-2023].

AEMET (2015) Guía de usuarios de la base de datos Escenarios-PNACC. Disponible en: https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_mensuales?w=0&v=WSS&e=HIST&p=Todos&f=Todos&b=1. [Consultado 18-05-2023].

Amblar Francés, P., Casado Calle, M.J., Pastor Saavedra, A., Ramos Calzado, P. y Rodríguez Camino, E. (2017) Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5. Ministerio de Agricultura Pesca, Alimentación y Medioambiente. Disponible en: https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/Guia_escenarios_AR5. [Consultado 23-04-2023].

Brunet, M., Casado M. J., Castro, M., Galán, M. P., López, J. A., Martín, J. M. y Torres, L. (2008) *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino.

Calvo Sánchez, F.J. (2020) “Modelos atmosféricos”. En: Santos Burguete, C. Ed. *Física del caos en la predicción meteorológica*. AEMET, pp. 129-143.

CLIVAR (2023). Objetivos de la red temática CLIVAR-España. Disponible en: (<http://www.clivar.org/about/about-clivar#Objective>). [Consultado 16-04-2023].

Fernández, J., Casanueva, A., Montávez, J.P., Gaertner, M.A., Casado, M.J., Manzanas, R. y Gutiérrez, J.M. (2017) “Proyecciones de clima regional sobre España: atmósfera. Proyecciones de clima future”, *Clivar Exchanges*, 73, pp. 45-52 y referencias citadas.

Gaertner, M.A., Gutiérrez, J.M. y Castro, M. (2012) Escenarios regionales de cambio climático, *Ref*, 26(2). Disponible en: <http://www.rsef.org>. [Consultado 16-04-2023].

Herrera, S., Gutiérrez, J. M., Ancell, R., Pons, M.R., Frías, M. y Fernández, D.J. (2012) “Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02)”, *International Journal of Climatology*, 32, pp. 74–85.

Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medioambiente (2017) *Adaptación al Cambio Climático de Zonas Urbanas Costeras con Elevada Densidad de Población e Interés Turístico y Cultural en España*. The European Climate Adaptation Platform Climate-ADAPT. Disponible en: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/countries-regions/countries/spain>. [Consultado 16-04-2023].

Ministerio de Medio Ambiente (2006) Programa Coordinado para Generación de Escenarios Regionalizados de Cambio Climático. Disponible en: https://www.aemet.es/documentos/es/idi/clima/escenarios_CC/programa_coordinado_escenarios_final.pdf. [Consultado 16-04-2023].

Petisco de Lara, S.E. (2008) *Método de regionalización de precipitación basado en análogos*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Windy Weather World (2023) What are ensemble models and how to use them for weather forecasting. Windy Weather World Inc. Disponible en: <https://windy.app/blog/how-to-use-ensemble-models-for-weather-forecast.html>. [Consultado 16-04-2023].

3.6. Bibliografía

Asociación Española de Climatología (2014) *Cambio Climático y Cambio Global. Serie A, 9*, Madrid: Asociación Española de Climatología (AEC).

Farmer, G.T. y Cook J. (2013) *Climate Change Science: A Modern Synthesis, Vol. 1 The Physical Climate*. Springer.

Montávez, J.P., Fernández, J., Casanueva, A., Gutiérrez, J.M. y Sánchez, E. (2017) "Proyecciones de clima regional sobre España: atmósfera. Evaluación del clima presente", *Clivar Exchanges*, 73, pp. 39-44.

Sánchez, E., Rodríguez-Fonseca, B., Bladé, I., Brunet, M., Aznar, R., Cacho, I., Casado, M.J., Gimeno, L., Gutiérrez, J.M., Jordá, G., Lavín, A., López, J.A., Salat, J. y Valero, B. (2017) "Progresos en la detección y proyecciones de cambio climático en España desde el informe 2010 de evaluación regional del clima pasado, presente y futuro del Comité CLIVAR-España", *Clivar Exchanges*, 73, pp. 1-4.

Capítulo 4: Adaptación al cambio climático

Contenidos

- 4.1. Adaptación al cambio climático
 - 4.1.1. Impacto
 - 4.1.2. Adaptación
- 4.2. Marco global
 - 4.2.1. Evolución histórica
 - 4.2.2. Comisión Global para la Adaptación al Cambio Climático
 - 4.2.3. El Sexto Informe de Evaluación del IPCC
 - 4.2.4. Escenarios del AR6
- 4.3. Marco europeo
- 4.4. Marco nacional
- 4.5. Comunitat Valenciana
 - 4.5.1. Marco general
 - 4.5.2. Objetivos
 - 4.5.3. Situación actual
- 4.6. Referencias
- 4.7. Bibliografía

Cada vez resulta más evidente que el cambio climático es un grave problema global cuya solución exige hacer frente a los complejos desafíos que presenta este fenómeno. Estos retos solo podrán superarse con éxito mediante el emprendimiento de acciones internacionales coordinadas. Una de las demandas más acuciantes es disponer de información para conocer el impacto del cambio climático con la suficiente resolución espacial y temporal. En este capítulo se revisan los principales programas y acciones realizadas hasta la fecha a las diferentes escalas internacional, europea, nacional y regional, poniendo especial atención a las acciones emprendidas en la Comunitat Valenciana.

4.1. Adaptación al cambio climático

4.1.1. Impacto

Según la Real Academia Española de la Lengua el término impacto significa “*huella o señal que deja un impacto*” y, más concretamente, define impacto ambiental como el “*conjunto de posibles efectos sobre el medio ambiente de una modificación del entorno natural, como consecuencia de obras u otras actividades*”. El **impacto del cambio climático**, por tanto, podría definirse como el conjunto de posibles efectos que el cambio climático tiene sobre los sistemas natural y humano. Dos aspectos de esta definición conviene que sean aclarados, por una parte, los efectos resultantes de este proceso no tienen necesariamente que ser negativos, o al menos, negativos en sentido generalizado. Por ejemplo, se ha comprobado que el incremento de temperatura a latitudes más elevadas está resultando en una mejora de las cosechas (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014). Por otra parte, estos efectos pueden ser reales, si ya se han observado, o potenciales, si no se han llegado a materializar todavía constituyendo, en ese último caso, y si tienen un carácter adverso, un peligro o amenaza. De este modo, la amenaza o peligro ante un suceso adverso está modulada por la probabilidad de que este se produzca. En el ámbito de la conservación de patrimonio, se denomina **riesgo** a la probabilidad de que la amenaza se convierta en un suceso. Dado que el riesgo viene definido en términos de probabilidad de la ocurrencia de un suceso, un peligro potencial posee valores de riesgo inferiores al 100 %, alcanzando el 100 % si llega a materializarse. El **impacto** asociado a una determinada amenaza también debería definirse en términos probabilísticos como la esperable (probable) pérdida de valor sufrida al acontecer el suceso. El impacto esperable sobre el sistema-diana está modulado por la sensibilidad y la exposición del sistema al agente de deterioro, en este caso, al cambio climático. La **vulnerabilidad**, definida como combinación de sensibilidad y exposición del sistema natural o humano al cambio climático, está condicionada por los procesos socioeconómicos y las formas de gobernanza. Como muestra la figura 4.1, pueden presentarse dos escenarios límite que se corresponderían con situaciones con mínimo impacto, si la amenaza posee inapreciable riesgo y vulnerabilidad y máximo impacto si posee máximo riesgo y vulnerabilidad. Entre estas situaciones extremas se puede dar toda una gama continua de situaciones intermedias.

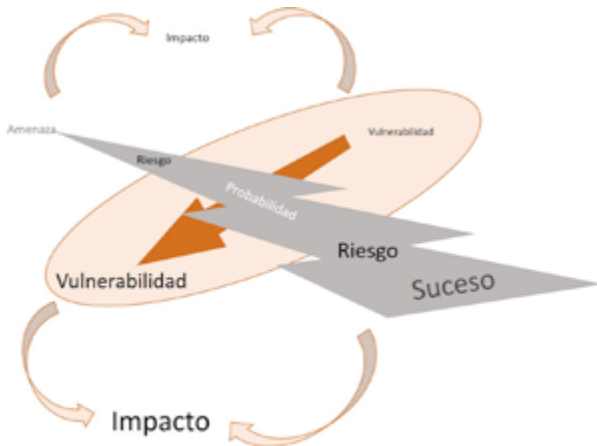


Figura 4.1. Relación entre impacto, riesgo y vulnerabilidad.

Otra característica del impacto del cambio climático es su complejidad ya que los efectos resultantes pueden variar de un sistema a otro y evolucionar con el tiempo produciendo una **cascada de impactos** como resultado de la interacción entre los sistemas naturales y humanos que se transmiten interconectados en cadena. Las figuras 4.2 a 4.4 muestran tres ejemplos de impactos transmitidos en cascada.

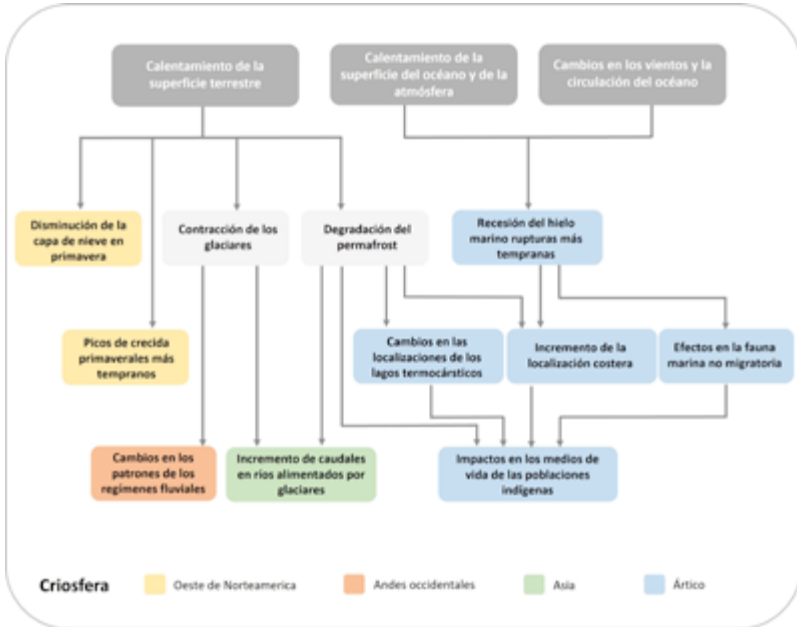


Figura 4.2. Esquema de cascada de impactos en la criosfera. Adaptado de Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014).

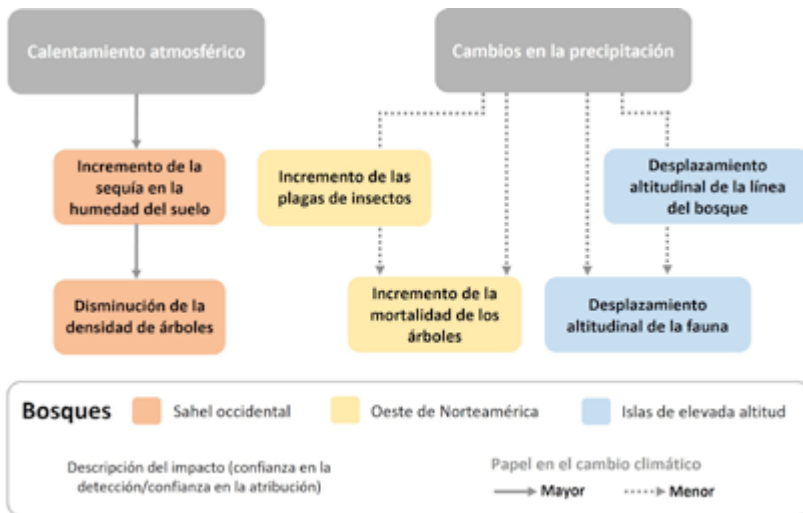


Figura 4.3. Esquema de cascada de impactos en los bosques. Adaptado de Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014).

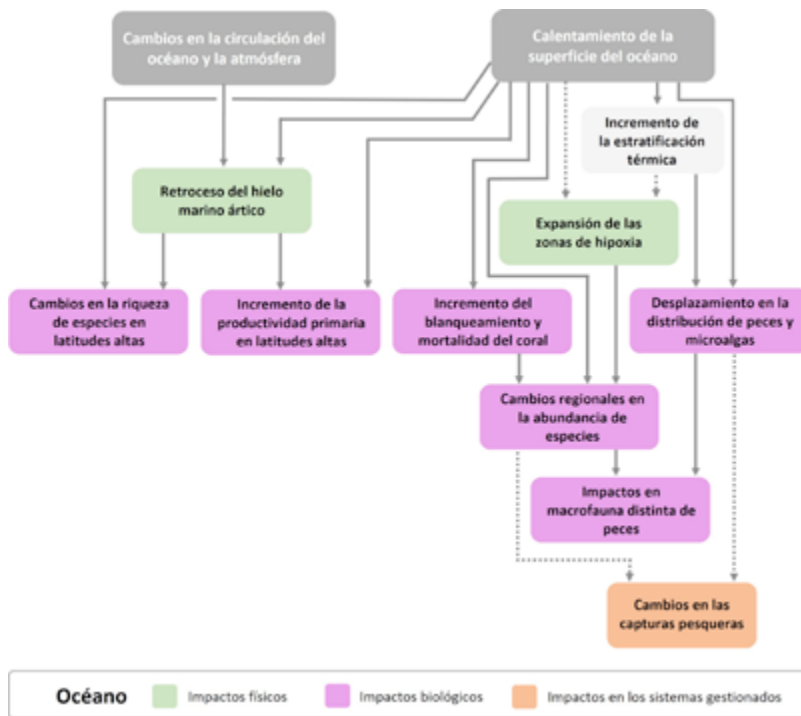


Figura 4.4. Esquema de cascada de impactos en los océanos. Adaptado de Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014).

El carácter probabilístico (riesgo) inherente a los sucesos asociados al cambio climático y su dependencia de la vulnerabilidad hace que cualquier valoración de su impacto deba efectuarse necesariamente en términos también probabilísticos. En los capítulos previos ya se ha mostrado que los estudios de la evolución futura del clima, debida al cambio climático, se desarrollan combinando modelos climáticos con previsiones socioeconómicas y demográficas a partir de las que se genera un conjunto de **escenarios futuros** caracterizados por:

- Probabilidad de ocurrencia.
- Intensidad y reversibilidad del impacto.
- Ámbito de aplicación.
- Persistencia en el tiempo.
- Nivel de vulnerabilidad del sistema.
- Posibilidad de mitigación o adaptación.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su Quinto Informe de Evaluación del Cambio Climático (AR5, por sus siglas en inglés) establece que, de entre los escenarios futuros, se distinguen aquellos considerados de **impacto clave** (con riesgo clave) por su elevada peligrosidad y/o la elevada vulnerabilidad del sistema (artículo 2 de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático: “interferencia antropogénica peligrosa con el sistema climático”).

Los impactos clave se caracterizan por (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014):

- Elevada intensidad y probabilidad del suceso.
- Irreversibilidad del impacto.
- Alcance espacial y temporal del impacto.
- Magnitud y persistencia de la vulnerabilidad.
- Capacidad limitada de disminución del riesgo mediante la adaptación o la mitigación.

Los **motivos de preocupación**, también definidos por el IPCC, se refieren a los impactos con riesgo clave en sectores o regiones específicas. Los motivos de preocupación muestran y advierten de la gravedad de los efectos del cambio climático en combinación con los límites de adaptación demostrados por los sistemas humanos y naturales en relación con el periodo 1986-2005 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014):

- Sistemas únicos y amenazados.
- Fenómenos meteorológicos extremos.
- Distribución de los impactos.
- Impactos agregados globales.
- Eventos singulares de gran escala.

4.1.2. Adaptación

La reducción del riesgo y del impacto una vez que se ha materializado el suceso, se logra a través de la adaptación o la mitigación. Tal como la define el IPCC en el AR5, la **adaptación** “es el proceso de ajuste de los sistemas naturales y humanos como respuesta a los estímulos resultantes del clima previsto por el proceso de cambio climático y a sus efectos, con el propósito de mitigar los daños o explotar las oportunidades y beneficios”. La adaptación incluye un conjunto de medidas proactivas para afrontar el efecto resultante de la conjugación de fenómenos adversos y la vulnerabilidad, en especial, la pobreza y a la falta de educación.

La Comisión Mundial sobre la Adaptación ha destacado los múltiples beneficios del proceso de adaptación entre los que cabe destacar el denominado “triple dividendo” de la adaptación: a) evitar pérdidas naturales, materiales y humanas en el futuro; b) generar beneficios económicos gracias a la reducción de riesgos y el aumento de la eficiencia y la promoción de la innovación y c) los beneficios sociales, ambientales y culturales.

En sintonía con estos criterios, para la Comisión Europea la adaptación es un proceso dirigido a aumentar la resiliencia, lograr una Europa sostenible basada en la autonomía estratégica y en la solidaridad. Entre las medidas de adaptación implementadas en Europa destacan los programas **Next Generation** de transición ecológica, de desarrollo de mecanismos de recuperación y resiliencia y de cohesión. Estos programas se han planteado como un instrumento para promover las inversiones y reformas que pueden ayudar a hacer frente a las crisis climáticas.

En un ámbito más operativo, se han establecido tres diferentes fases de la evolución temporal del cambio climático y de la implantación de mecanismos de adaptación y mitigación. Véase en la figura 4.5 la distribución temporal efectuada para el ámbito de la salud (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014): (i) el momento presente, que permite efectuar una observación y determinación de las condiciones iniciales a partir de las cuales se pueden elaborar los modelos predictivos de evolución del clima y de los procesos socioeconómicos; (ii) el período 2030-2040 denominado “era del cambio climático comprometido”, para la que la previsión del incremento de temperatura media es de +1,5 °C y (iii) el período 2080-2100 denominado “era de las opciones climáticas”, para el que la previsión es de +4 °C. Para cada período se hacen estimaciones del riesgo considerando el nivel de adaptación actual y una elevada adaptación, a partir de lo cual se evalúa el potencial de reducción de riesgo a través de la adaptación.

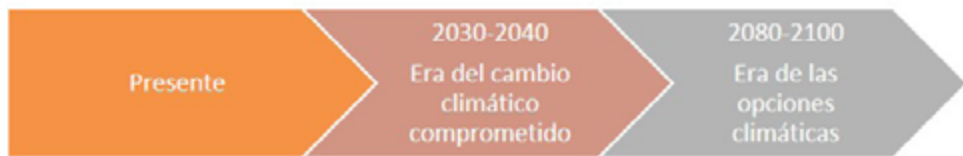


Figura 4.5. Fases de la evolución temporal del cambio climático y de la implantación de mecanismos de adaptación y mitigación.

También se han establecido dos tipos de adaptación (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014). La **adaptación progresiva** sería una prolongación de acciones y comportamientos, ya implantados, para minimizar los impactos negativos o incrementar los impactos positivos del cambio climático. Esta adaptación se llevaría a cabo paulatinamente y sería suficiente si la intensidad y rapidez del cambio climático se mantiene en unos niveles mínimos o moderados. La **adaptación transformacional** comporta actuaciones para modificar drásticamente (en escala, intensidad o localización) los atributos de un sistema para acomodarlos a los efectos observados o esperados del cambio climático. Esta adaptación es de aplicación cuando la vulnerabilidad sea alta y la magnitud del efecto sobrepase la resiliencia del sistema.

Tanto en la adaptación progresiva como en la transformacional se han establecido una serie de categorías tal como resume la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Categorías de los procesos de adaptación al cambio climático.

Categoría	Ejemplo
Desarrollo humano	Mejora de la educación
Alivio de la pobreza	Mejora del acceso y control de los recursos
Seguridad de los medios de subsistencia	Diversificación de actividades

Gestión de riesgos de desastres	Sistemas de alerta temprana
Gestión de ecosistemas	Gestión comunitaria de ecosistemas
Planificación espacial o de uso del suelo	Mejora de planificación urbanística y de recursos naturales
Planificación estructural y física	Mejora de servicios sociales y sanitarios
Planificación social	Educación (campañas de sensibilización), información (servicios climáticos), comportamiento (diversificación de medios de subsistencia)
Planificación institucional	Economía (incentivos financieros), legislación (planificación urbanística), programas gubernamentales y regionales (planes de adaptación)

Junto a la adaptación, el IPCC define la **mitigación** como la intervención antropogénica para reducir las fuentes o mejorar los sumideros (capítulo 1) de los gases de efecto invernadero (GEI).

4.2. Marco global

4.2.1. Evolución histórica

La figura 4.6. muestra los principales hitos que han tenido lugar como resultado de la evolución del cambio climático y las políticas de energía a escala global. El primer gran evento fue la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático que tuvo lugar en 1992 durante la Cumbre de la Tierra de las Naciones Unidas en Río de Janeiro. En esta reunión se estableció el objetivo de “ *fijar las concentraciones de GEI a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas con el sistema climático*”. En 1995 los países que la suscribieron (actualmente 197) tuvieron una segunda reunión, la Conferencia de Berlín. En 1997, se aprobó el Protocolo de Kioto. Inicialmente, los esfuerzos se centraron en la mitigación de efectos, hasta que, tras la publicación del tercer informe del IPCC, se incorporan los procesos de la adaptación (Generalitat Valenciana, 2018).

4.2.2. Comisión Global para la Adaptación al Cambio Climático

En la actualidad, la Comisión Global (Mundial) para la Adaptación al Cambio Climático (GCA, por sus siglas en inglés) dependiente de las Naciones Unidas, puede considerarse el órgano más específico creado para los asuntos relacionados con el cambio climático a nivel internacional. La GCA fue creada en 2018 con el mandato de acelerar el proceso de adaptación y encontrar soluciones concretas.



Figura 4.6. Principales hitos producidos en el marco del cambio climático y las políticas de energía. Adaptado de (Generalitat Valenciana, 2018).

Los dos documentos clave en relación a la adopción de acciones internacionales para promover la adaptación y reducir el impacto del cambio climático son la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Naciones Unidas, 1992) y el Acuerdo de París (Naciones Unidas, 2015). Este último, atiende las necesidades puestas en evidencia en 2005 tras la entrada en vigor del Protocolo de Kioto acerca de la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y de emprender acciones conjuntas e inclusivas para hacer frente a los efectos adversos del cambio climático. En estas acciones, de modo general, se distingue entre: a) las propias acciones de mitigación y adaptación y b) los medios para la implementación de ambas. Con el Acuerdo de París los países firmantes fijan el objetivo de mantener el incremento de la temperatura media global por debajo de los 2°C respecto a los niveles preindustriales, y de limitar el calentamiento global a 1,5°C. También se fija como objetivo la adopción de acciones para incrementar la adaptación y disminuir la vulnerabilidad frente a los efectos adversos del cambio climático y emprender actividades formativas. Por último, se acuerda establecer un sistema de transparencia en cada país para conocer el progreso hacia los objetivos marcados. Este sistema de balance global o Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) cada cinco años evalúa el progreso colectivo.

Paralelamente, se propone llevar a cabo la implementación de instrumentos transversales como la **Acción para el Empoderamiento Climático** (ACE) cuyo objetivo es,

“...prepara a las personas, los encargados de tomar decisiones, las entidades gubernamentales, los sectores productivos y la sociedad en general para los desafíos que conlleva el cambio climático y los capacita para actuar ante ellos” (UNESCO, 2020).

La ACE incluye seis tipos de actuaciones tal como refleja la tabla 4.2:

Tabla 4.2. Elementos principales de la ACE. Adaptado de (UNESCO, 2020).

Elemento	Características	Objetivos
Educación	<i>“La educación busca lograr cambios profundos a largo plazo en la comprensión, particularmente entre los jóvenes. Implica el desarrollo de planes de estudio educativos, formación de formadores y profesores y pedagogías adecuadas. Un programa exitoso daría como resultado, en última instancia, una población con una valoración profundamente arraigada del desafío climático que conduciría a una mayor acción y compromiso a nivel nacional”.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>“Promover, facilitar, desarrollar y llevar a cabo programas oficiales, extraoficiales e informales de educación climática que fomenten un comportamiento respetuoso con el clima, centrándose tanto en la mitigación como en la adaptación.</i> • <i>Incluir el cambio climático en todos los niveles y en todas las disciplinas, tanto en los planes de estudio escolares y de educación superior, como en la educación y formación técnica y profesional (EFTP) y la educación para adultos, para dirigirlos a toda la población”.</i>

Formación

“Los programas de formación buscan difundir habilidades prácticas específicas que pueden tener una aplicación práctica inmediata. Dichas habilidades incluyen, por ejemplo, la capacidad de recopilar e interpretar datos climáticos, elaborar inventarios de emisiones nacionales e identificar tecnologías respetuosas con el clima. La formación consiste en aprender de forma práctica, y tanto las personas como las comunidades o las organizaciones pueden beneficiarse del aprendizaje continuo”.

- *“Identificar y anticipar las competencias actuales y futuras, así como las necesidades de formación para la transición hacia economías verdes, teniendo en cuenta a diferentes grupos de población y garantizando un acceso equitativo.*
- *Integrar e incorporar el aprendizaje sobre el cambio climático en los planes de estudio de las instituciones que brindan formación oficial a todos los niveles, incluidos los organismos profesionales, los programas de aprendizaje y las organizaciones comerciales.*
- *Desarrollar materiales de formación de acuerdo con las circunstancias nacionales, los enfoques sectoriales y el contexto cultural.*
- *Cooperar, promover, facilitar, desarrollar e implementar programas de formación (incluida la formación de formadores) centrados en el cambio climático para grupos que desempeñan un papel clave, tales como los responsables de la toma de decisiones y la elaboración de políticas, el personal científico, técnico y directivo de los sectores público y privado, periodistas, mujeres, jóvenes y líderes comunitarios, a nivel local, nacional, subregional, regional, sectorial e internacional”.*

Sensibilización
ciudadana

“Hay muchos gobiernos, organizaciones no gubernamentales (ONG), organizaciones intergubernamentales y organismos de la ONU que ya han presentado programas importantes para la sensibilización del público. Sin embargo, sigue habiendo una enorme necesidad de una mayor difusión. La creación de un programa de difusión exitoso que realmente logre cambiar el comportamiento implica mantener campañas comunicacionales específicas y sistemáticas”.

- *“Cooperar, promover, facilitar, desarrollar e implementar programas inclusivos de sensibilización pública sobre el cambio climático y sus efectos a nivel local, regional y nacional, según corresponda.*
- *Crear mensajes clave que faciliten y amenicen la labor de las personas con respecto a la acción climática y desarrollen y ejecuten campañas de acción para alentarlas a llevar a cabo gestos pequeños y sencillos que puedan.*
- *Conducir a un cambio duradero, por ejemplo, la reducción del uso personal de agua o electricidad.*
- *Fomentar, a través de los medios de comunicación populares, acciones y contribuciones personales para abordar.*
- *El cambio climático, apoyar políticas respetuosas con el clima y promover cambios de comportamiento, teniendo en cuenta la importancia del papel que tanto las redes sociales como las plataformas y estrategias digitales pueden desempeñar en este contexto.*
- *Colaborar con la sociedad civil y los socios del sector privado para garantizar una amplia difusión de las actividades de sensibilización del público y limitar la difusión de «noticias falsas» y campañas de desinformación.*
- *Realizar encuestas para establecer el punto de partida de la sensibilización del público, que puede servir como base para un trabajo adicional y apoyar la supervisión del impacto de las actividades.*
- *Reconocer e involucrar a la juventud como poseedores de conocimiento, y apoyar su participación como agentes de cambio y/o formadores en campañas de sensibilización pública”.*

Acceso a la información

“Los programas para involucrar a los ciudadanos y a las OSC en el tratamiento del cambio climático pueden mejorarse garantizando que la información esté disponible gratuitamente. Esto es fundamental para desarrollar y ejecutar políticas efectivas, así como para involucrar activamente a las personas en la implementación de dichas políticas. Ciertas tecnologías, tales como las bases de datos o Internet, facilitan la provisión de información, datos y estadísticas relacionadas con el clima a toda la ciudadanía”.

- *Garantizar el acceso público a la información y los datos relacionados con buenas prácticas, iniciativas de cambio climático, políticas y resultados de acciones, para que el público pueda comprender el cambio climático y responder ante este. Este esfuerzo debería aprovechar las nuevas tecnologías de la información, teniendo en cuenta factores como la calidad del acceso a Internet, la alfabetización y las cuestiones de género e idioma.*

Participación ciudadana

“Los gobiernos deben tratar de integrar las perspectivas de la sociedad civil y movilizar al público en general garantizando que las personas puedan participar de manera efectiva en la toma de decisiones sobre el cambio climático e implementar actividades de mitigación y adaptación en materia climática. En algunos lugares, esto conllevará cambios significativos en los hábitos de trabajo de los funcionarios y líderes políticos y alentará a las personas a estar más atentas a la elaboración de políticas”.

- *“Fomentar la participación de las organizaciones intergubernamentales (OIG), las autoridades regionales y locales, las organizaciones no gubernamentales (ONG) y las organizaciones comunitarias, así como de los sectores público y privado, para sensibilizar y aumentar la comprensión de las causas y el impacto del cambio climático, y promover soluciones que conduzcan a resultados cuantificables.*

- *Crear y apoyar plataformas abiertas y accesibles de múltiples partes interesadas para el diálogo y la participación pública que involucren a la juventud, la sociedad civil, el mundo académico y el sector privado para alcanzar el consenso de toda la sociedad sobre la acción climática y la ambición de la NDC.*

- *Promover el diálogo social y la participación pública inclusiva para abordar el cambio climático y sus efectos, así como desarrollar respuestas adecuadas, facilitando la retroalimentación, el debate y la asociación en las actividades relacionadas con el cambio climático y la gobernanza, teniendo en cuenta la importancia del papel que pueden desempeñar las plataformas y estrategias de las redes sociales en este contexto.*

- *Reforzar la interacción entre ciencia, política y sociedad fomentando la participación de la ciudadanía como coproductores de conocimiento (ciencia ciudadana)”.*

Cooperación internacional

“La cooperación internacional y el intercambio pueden desempeñar un papel importante en el fortalecimiento de los esfuerzos ACE. Hay muchos gobiernos y partes interesadas relevantes que necesitan acceso a conocimientos y recursos técnicos y financieros para poder desarrollar sus propios programas sobre cambio climático. Todos los países pueden beneficiarse del intercambio de historias de éxito, del intercambio de personal y del refuerzo de la capacidad institucional”.

- *“Fomentar la cooperación subregional, regional, sectorial e internacional en la puesta en marcha de actividades dentro del ámbito de ACE para mejorar la competencia colectiva de las Partes e interesados que no son Partes para aplicar el Convenio y el Acuerdo de París.*
- *Documentar y compartir el conocimiento entre países con respecto a experiencias, lecciones aprendidas, buenas prácticas y desafíos en la implementación de ACE, así como promover el aprendizaje entre iguales, para que las Partes, las OIG y las ONG que tienen los recursos para hacerlo puedan dirigir sus esfuerzos de manera*
- *efectiva a proporcionar el apoyo adecuado.*
- *Desarrollar e impulsar programas de intercambio internacional entre profesionales del gobierno, docentes, estudiantes e investigadores con respecto a la formación sobre cambio climático”.*

La realización del presente proyecto I+D y, en particular, la edición de este texto, está en absoluta sintonía con el mandato reflejado en la ACE.

4.2.3. El Sexto Informe de Evaluación del IPCC

En marzo de 2023 se publicó el sexto informe de evaluación del IPCC (AR6, por sus siglas en inglés) en el que se incluyen los resultados obtenidos por los grupos de trabajo I, II y III que versaban sobre la actualización de las bases científicas del cambio climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023):

- Informe Especial sobre Calentamiento Global de 1,5 °C. (Masson-Delmotte, V. *et al.*, 2019).
- Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (Eggleston *et al.*, 2006).
- Informe especial sobre el cambio climático y la tierra (Masson-Delmotte, V. *et al.*, 2020).
- Informe especial sobre el océano y la criosfera en un clima cambiante (Pörtner, H.-O. *et al.*, 2019).
- Cambio Climático: Bases Físicas. Informe del Grupo I (AEMET y OECC, 2021).
- Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Informe del Grupo II (OECC, 2022a).

- Mitigación del cambio climático OECC. Informe del Grupo III (OECC, 2022b).
- AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

Un extracto del contenido del documento resumido (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023) se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Extracto del contenido del documento AR6.

Secciones del informe	Subsecciones	Contenidos
Estado actual del problema y tendencias	Evidencias que confirman que la existencia de un calentamiento global y sus causas	La actividad humana, a través de las emisiones de GEI ha causado inequívocamente un calentamiento global de 1,1 °C desde 1850-1900 a 2011-2020. Las emisiones de GEI han continuado incrementándose históricamente y en el futuro de manera desigual debido al uso insostenible de fuentes de energía no renovables, de la tierra, de cambios en el uso de la tierra, de estilos de vida y hábitos de consumo y producción entre regiones, dentro y entre estados y entre individuos.
	Cambios observados e impactos	Se han producido diversos cambios rápidos y amplios en la atmósfera, el océano, la criosfera y la biosfera. El cambio climático causado por los seres humanos está afectando ya la meteorología en buena parte del planeta y está generando climas extremos. Esto ha llevado a una generalización de impactos adversos con las correspondientes pérdidas y daños en la naturaleza y en los seres humanos. Siendo las comunidades más vulnerables, que históricamente han contribuido a frenar el cambio climático, desproporcionadamente afectadas.
	Actual avance de la adaptación, brechas y desafíos	Los planes de adaptación han avanzado en numerosas regiones del planeta con beneficios, aunque con efectividad muy variada. Pese al avance logrado, existen todavía brechas que crecerán. En algunos ecosistemas se ha alcanzado niveles de adaptación con eficacia variable desde muy baja a muy elevada. Lo que pone de manifiesto que la inversión dedicada a la adaptación es insuficiente limitando las opciones, en particular, en países en vías de desarrollo.
	Avance en la mitigación, brechas y desafíos	Las políticas y leyes dirigidas a promulgar medidas de mitigación han proliferado desde la publicación del AR5. La emisión global de GEI en 2030 producida por las diferentes naciones que se anunció en 2021 hace altamente probable que se exceda en 1,5 °C la temperatura global durante el siglo XXI, lo que dificulta mantener el calentamiento por debajo de 2 °C. Hay brechas entre las proyecciones y las políticas implementadas y entre estas últimas y las inversiones, que son insuficientes para alcanzar los objetivos propuestos.

Futuro del cambio climático, riesgos y respuestas a largo plazo	Futuros cambios en el clima	La emisión continuada de GEI llevará a un incremento global del calentamiento con unas estimaciones de alcanzar el incremento en 1,5 °C en el corto plazo, a partir de las proyecciones realizadas. Cada incremento del calentamiento intensificará los peligros múltiples y concurrentes. Por el contrario, la reducción rápida, intensa y sostenida de la emisión de GEI podría generar una reducción notable en el calentamiento global en dos décadas y también llevaría a cambios apreciables en la composición de la atmósfera en unos pocos años.
	Impactos y riesgos	Para cada nivel de calentamiento futuro se establecen valores para muchos riesgos asociados al clima más elevados que los que se establecieron en el AR5 y proyecciones de impactos a largo plazo mucho mayores que los observados actualmente. Estos impactos y riesgos y los daños asociados escalan con cada incremento del calentamiento. Los riesgos climáticos interactuarán con los riesgos no climáticos creando fenómenos en cascada difíciles de manejar.
	Probabilidad de riesgos de cambios abruptos, irreversibles e inevitables	Algunos cambios futuros serán inevitables y/o irreversibles, pero pueden ser evitados con una rápida, intensa y sostenible reducción de la emisión de GEI. Esta probabilidad de riesgos de cambios abruptos, irreversibles e inevitables aumenta a medida que los niveles de calentamiento se incrementan. De modo similar, la probabilidad de una baja probabilidad de resultados asociados con impactos potencialmente muy adversos aumenta al incrementarse el nivel de calentamiento.
	Límites de las opciones de adaptación	Las opciones de adaptación que son viables y efectivas actualmente se verán limitadas y serán menos efectivas a medida que aumente el nivel de calentamiento. Las pérdidas y daños se incrementarán y los sistemas humano y natural alcanzarán los límites de su adaptabilidad. Esto puede ser evitado mediante una planificación, a largo plazo, inclusiva, multisectorial y flexible y con la implementación de acciones de adaptación con co-beneficios en muchos sistemas y sectores.
	Presupuesto de carbono y emisiones cero	Reducir el calentamiento causado por el ser humano exige alcanzar un nivel nulo de emisiones de CO ₂ . La acumulación de emisiones hasta alcanzar el nivel cero CO ₂ y GEI en esta década determinará si se alcanza el valor 1,5 °C o 2 °C. Las proyecciones de emisión de CO ₂ a partir del consumo de combustibles fósiles sin restricciones excedería la estimación de emisiones por carbono en 1,5 °C (50 %).
	Rutas de mitigación	Todas las rutas que limitan el calentamiento a 1,5 °C (>50 %) y a 2 °C (>67 %) implican una rápida e intensa reducción de las emisiones de GEI en todos los sectores en esta década. El nivel de emisiones cero se alcanzaría en 2050 y 2070, respectivamente.

	Sobrepasando un nivel de calentamiento y retornando	Si el calentamiento excede el nivel 1,5 °C sería posible retornar a un nivel cero de emisiones. Esto requerirá una eliminación de CO ₂ extra creando mayores limitaciones de sostenibilidad y viabilidad. También conllevará impactos adversos, algunos de ellos irreversibles y con riesgos adicionales para los sistemas humanos y naturales. Todo ello aumentará con la magnitud del incremento del excedente en calentamiento.
Respuestas en el corto plazo	Urgencia de una acción integrada a corto plazo	El cambio climático es una amenaza para el ser humano y la salud del planeta. La ventana de oportunidades para asegurar un futuro habitable y sostenible para todos se está cerrando con rapidez. El desarrollo resiliente al clima implica adaptación y mitigación para avanzar en el desarrollo sostenible para todos y solo es posible a través de la cooperación internacional, lo que implica el acceso a recursos financieros, especialmente en las regiones, sectores y grupos vulnerables, gobernanzas inclusivas y políticas coordinadas. Las decisiones y acciones actuales tendrán impacto en los próximos miles de años.
	Los beneficios de la actuación en el corto plazo	La rápida y eficaz realización de acciones de mitigación y adaptación en esta década reducirá las pérdidas y daños proyectados en los sistemas humano y natural y generará mayores beneficios, especialmente en calidad del aire y salud. El retraso de la mitigación y adaptación incrementará pérdidas y daños, así como los riesgos de estrangulamiento de valores y escalada de costes. Las actuaciones en el corto plazo implican realizar elevadas inversiones directas y cambios drásticos mediante políticas adecuadas.
	Mitigación y adaptación a través de los sistemas	Son necesarias transiciones rápidas y de gran alcance en todos los sectores y sistemas para lograr reducciones sostenidas e importantes de las emisiones y un futuro seguro para todos.
		Las transiciones implican el escalado de una amplia variedad de acciones de adaptación y mitigación.
		Las opciones viables, efectivas y de bajo coste son ya posibles salvando diferencias entre sistemas y regiones
Sinergias y compensaciones con el desarrollo sostenible		Acciones rápidas y equitativas de adaptación y mitigación son críticas para alcanzar un desarrollo sostenible.
		Estas acciones tienen sinergias y compensaciones con el desarrollo sostenible y, estas últimas, dependen de la escala de implementación de las acciones.

Equidad e inclusión	<p>Priorización de procesos de equidad, justicia climática, justicia social e inclusión conllevarían adaptación, mitigación y desarrollo resiliente.</p> <p>Los resultados de la adaptación se incrementan mediante el aumento del apoyo a las regiones y grupos vulnerables.</p> <p>La integración de la adaptación al clima en programas sociales mejora la resiliencia.</p> <p>Acciones como los cambios en el comportamiento y estilo de vida reduciendo el consumo generan co-beneficios sociales y de bienestar.</p>
Gobernanza y políticas	<p>Una acción efectiva requiere compromiso político, gobernanzas multinivel bien alineadas, marcos institucionales, leyes, políticas y estrategias.</p> <p>Objetivos claros, coordinación a través de múltiples dominios políticos, procesos de gobernanza inclusiva, regulación de los instrumentos económicos serían muy eficaces si se adaptan ampliamente.</p>
Finanzas, tecnología y cooperación internacional	<p>Estas tres características son críticas. Los presupuestos para adaptación y mitigación deben ser incrementados. Actualmente hay suficiente capital global para cerrar las brechas de inversión global, pero hay barreras para redirigir adecuadamente el capital. Los sistemas de desarrollo tecnológico deben ser incrementados pues estos son un vehículo imprescindible para acelerar la adopción amplia de tecnologías y prácticas idóneas. El incremento de la cooperación internacional es posible a través de la creación de canales múltiples.</p>

4.2.4. Escenarios del AR6

La tabla 4.4 resume las evidencias demostradas científicamente en el AR6 que confirman la existencia de un calentamiento global y sus causas (Intergovernmental Panel on Climate Change (2023)).

Tabla 4.4. Impactos relevantes evidenciados en el AR6.

Efecto	Magnitud	Especificación
Incremento de la temperatura global desde 1850-1900 a 2011-2020	1,09°C [0,95°C-1,20°C]	
Incremento de la temperatura global en los continentes desde 1850-1900 a 2011-2020	1,59°C [1,34 °C-1,83°C]	
Incremento de la temperatura global en los océanos desde 1850-1900 a 2011-2020	0,88 °C [0,68 °C-1,01 °C]	
Rango probable de incremento de temperatura global causado por la actividad humana desde 1850-1900 a 2010-2019	1,07 [0,8°C -1,3°C]	
Rango probable de incremento de temperatura global causado por la emisión de gases de efecto invernadero desde 1850-1900 a 2010-2019	1,0°C -2,0°C	
Rango probable de incremento de temperatura global causado por la emisión de aerosoles desde 1850-1900 a 2010-2019	0,0°C -0,8°C	
Rango probable de incremento de temperatura global causado por agentes de forzamiento naturales (radiación solar y vulcanismo) 1850-1900 a 2010-2019	-0,1±0,2°C a +0,1±0,2°C	
Emisiones netas acumulativas de CO ₂ desde 1850 a 2019	2400±240 GtCO ₂	58 % entre 1850-1989 42 % entre 1990 y 2019
Emisiones globales netas de GEI en 2019	59±6,6 GtCO ₂ -eq	
	12 %	Más elevadas que en 2010
	54 %	Más elevadas que en 1990
	79 %	Procedentes: Energía, industria, transporte y edificación
	22 %	Agricultura y otros usos

Incremento del nivel del mar entre 1901 y 2018	0,20 [0,15-0,25] m	
Velocidad de ascenso del nivel del mar	1,3 [0,6-2,1] mm año ⁻¹	Entre 1901 y 1971
	1,9 [0,8-2,9] mm año ⁻¹	Entre 1971 y 2006
	3,7 [3,2-4,2] mm año ⁻¹	Entre 2006 y 2018

Como ya se estableció en los capítulos 1 y 2, las proyecciones climáticas simulan la evolución que tendrá el clima en el futuro y están basadas en un conjunto de escenarios que se construyen a partir de una serie de supuestos referentes al desarrollo socioeconómico, tecnológico y a las diferentes opciones de mitigación. En el AR5 se definieron las rutas de concentración representativas (RCPs, por sus siglas en inglés) que correspondían a diversos escenarios de evolución socioeconómica y tecnológica. La figura 4.7 ilustra estas RCPs. La línea verde muestra el incremento en emisiones desde 1980 a 2014 y un escenario favorable (RCP2.6) en el que las emisiones se mantienen e incluso reducen. La línea roja (RCP4.5) y la línea negra (RCP6.0) presentan escenarios intermedios y, progresivamente, más desfavorables. Por último, la línea azul corresponde al escenario más desfavorable (RCP8.5) en el que no se podrán mitigar las emisiones.

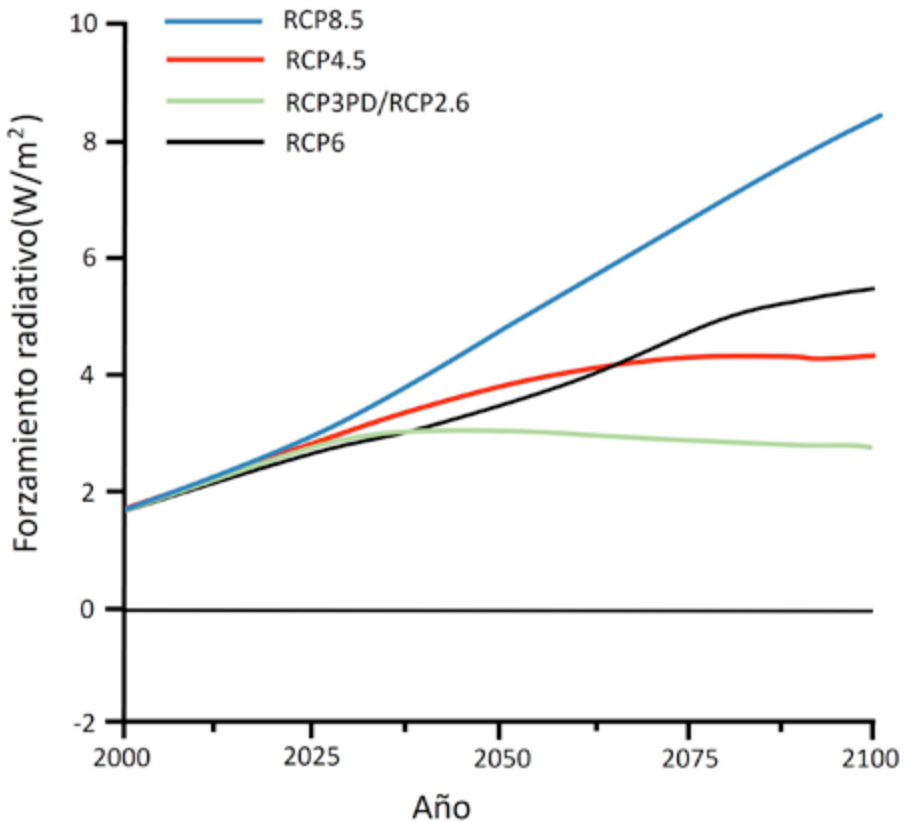


Figura 4.7. Posibles rutas de las emisiones de CO₂ en las diferentes proyecciones a futuro establecidas en el AR5.

En el AR6, las rutas socioeconómicas compartidas (SSPs, por sus siglas en inglés) y las RCPs definidas en el AR5, se han usado para explorar cómo evolucionarán las emisiones de GEI y el calentamiento global, así como los impactos y peligros que llevarán asociados, junto con las posibles estrategias de mitigación y adaptación. El Grupo de Trabajo I del IPCC ha evaluado la respuesta climática a cinco escenarios que cubren un amplio rango de posibles evoluciones de los agentes antropogénicos responsables del cambio climático.

- *SSP1 o de sostenibilidad*: requiere una baja exigencia de mitigación y adaptación. Se caracteriza por: crecimiento bajo de la población; alto crecimiento económico; alto nivel de educación; gobernabilidad; sociedad globalizada; cooperación internacional; desarrollo tecnológico y conciencia ambiental.
- *SSP2*: escenario intermedio entre SSP1 y SSP3.
- *SSP3 o de fragmentación*: requiere una elevada exigencia de adaptación y mitigación. Se caracteriza por: alto crecimiento de la población; bajo desarrollo económico; nivel bajo de educación; sociedad regionalizada y con poca conciencia ambiental.
- *SSP4 o de desigualdad*: requiere elevada exigencia de adaptación. Se caracteriza por: tecnología avanzada en los países desarrollados y desigualdad social.
- *SSP5*: requiere elevada exigencia de nivel mitigación. Se caracteriza por: mantenimiento de una elevada dependencia de los combustibles fósiles; bajo crecimiento de la población; elevado crecimiento económico y elevado desarrollo humano.

En el esquema de la figura 4.8 se indica la exigencia de adaptación y mitigación correspondiente a cada una de las SSPs.



Figura 4.8. Distintos grados de exigencia de adaptación y mitigación correspondientes a cada una de las SSPs contempladas en el IE-EE del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC.

En las rutas SSP3-7.0 y SSP5-8.5 se supone que las emisiones de CO₂ duplican los niveles actuales en 2100 y 2050, respectivamente. La ruta SSP2-4.5 representa una situación intermedia en la que las emisiones de CO₂ permanecen en el nivel actual hasta la mitad de esta centuria. Las rutas SSP1-1.9 y SSP1-2.6 asumen muy bajas y bajas emisiones de CO₂, respectivamente, alcanzando las cero emisiones en 2050 y 2070, correspondientemente, e incluso se prosigue con emisiones negativas de CO₂.

Las RCPs se incorporan en el informe de los Grupos de Trabajo I y II para evaluar los cambios, impactos y riesgos de los climas regionales. En el Grupo de Trabajo III se configura un amplio número de rutas de emisión global de CO₂. De todas ellas, 1202 fueron agrupadas en categorías en función del calentamiento global en el siglo XXI. Estas categorías abarcan rutas desde la C1, que limita el calentamiento a 1,5 °C con más del 50 % de probabilidad sin sobrepasar este límite o superando este límite ligeramente, hasta la C8, en la que el calentamiento alcanza los 4 °C. La figura 4.9 muestra esquemáticamente dichas relaciones desde los escenarios más favorables, en la base de la pirámide, a los más desfavorables situados en la cúspide.

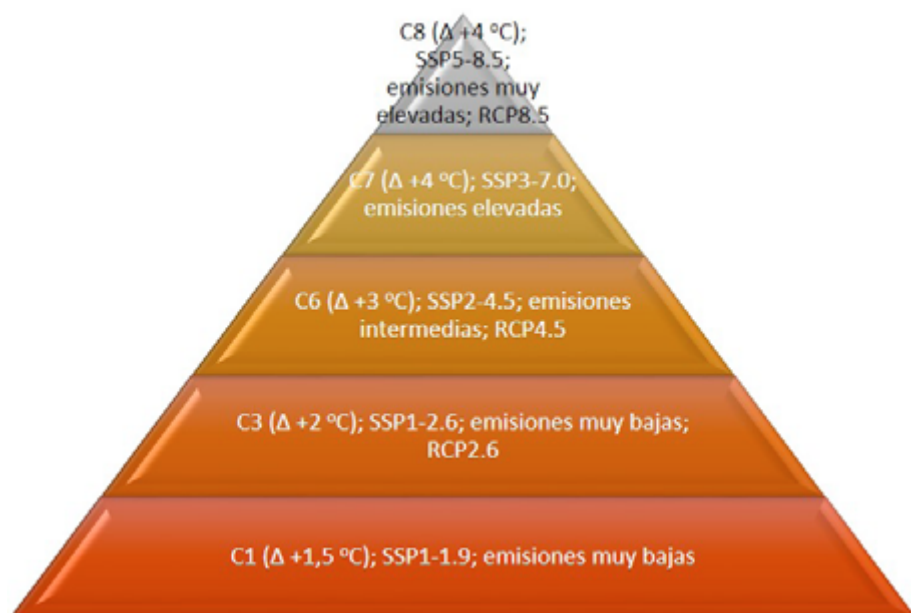


Figura 4.9. Distintos escenarios de cambio climático contemplados en el AR6 del IPCC. Descripción de relaciones entre los escenarios modelados por el grupo de trabajo III y las rutas modeladas por los grupos de trabajo I y II del IPCC para el AR6.

4.3. Marco europeo

Desde 2009 la Comisión Europea ha incrementado las actividades de seguimiento de los efectos del cambio climático. La actuación más reciente se fecha en 2021, momento en el que emite el informe “Forjar una Europa resiliente al cambio climático-La nueva estrategia de adaptación al cambio climático de la UE” (Comisión Europea, 2021) en el que se establecen las bases para una acción conjunta de los países miembros para acometer medidas de adaptación al cambio climático. Este informe se sustenta en los siguientes aspectos que ya forman parte de la situación actual:

- *“El cambio climático está ocurriendo hoy, así que tenemos que construir un mañana más resiliente.*
- *Aunque se detuvieran todas las emisiones de gases de efecto invernadero, se seguirían produciendo impactos climáticos que ya ocurren.*

- *La frecuencia y gravedad de los fenómenos climáticos y meteorológicos extremos está aumentando.*
- *Las repercusiones del cambio climático están teniendo efectos de gran alcance dentro y fuera de la Unión.*
- *Aumentan las pérdidas económicas causadas por fenómenos extremos relacionados con el cambio climático que se producen más frecuentemente.*
- *Europa crece para hacer frente al desafío del cambio climático.*
- *Existe un consenso mundial cada vez más amplio sobre la importancia de la adaptación”.*

En el informe también se establecen las metas y procedimientos de actuación:

- *“El Pacto Verde Europeo, la estrategia de crecimiento de la UE para un futuro sostenible, se basa en la constatación de que la transformación ecológica es una oportunidad y que la inacción tiene un coste enorme.*
- *La visión a largo plazo para la UE en 2050 es la de una sociedad resiliente frente al cambio climático, plenamente adaptada a los efectos inevitables del cambio climático.*
- *La propuesta de Ley Europea del Clima proporciona las bases para una mayor ambición y coherencia política en materia de adaptación.*
- *La UE ya ha tomado medidas para aumentar su resiliencia durante los últimos años en el marco de la Estrategia de adaptación de 2013.*
- *Los Estados miembros seguirán siendo los principales asociados para la ejecución y una actuación más ambiciosa y proactiva a escala de la UE les ayudará a atender a sus necesidades de adaptación”.*

Así como el espíritu del que debe estar imbuido el proceso de adaptación:

- *“La gravedad del desafío de la adaptación lo convierte en un esfuerzo de todo el gobierno y de toda la sociedad.*
- *La estrategia aspira a materializar la visión de una Unión en 2050 resiliente frente al cambio climático, favoreciendo que la adaptación sea más inteligente, más sistémica y más rápida, e intensificando la acción internacional.*
- *Adaptación más inteligente: mejora del conocimiento y gestión de la incertidumbre.*
- *Adaptación más sistémica: apoyar el desarrollo de políticas en todos los niveles y sectores.*
- *Adaptación más rápida: acelerar la adaptación en todos los ámbitos”.*

Este informe fija seis líneas de actuación:

- Incrementar las medidas para frenar el impacto del cambio climático mediante servicios y plataformas.
- Dar respuestas de adaptación al aumento del nivel del mar y los cambios en las costas.

- Dar soluciones ecológicas a la adaptación al cambio climático.
- Preparación para la mayor frecuencia y severidad de climas extremos.
- Reencuadrar la transformación de la sociedad desafiando las suposiciones subyacentes.
- Resiliencia energética.

La adaptación al cambio climático se centra en dar soporte a las autoridades regionales y locales en sus esfuerzos por construir entornos resilientes contra los impactos negativos del cambio climático para configurar una Europa sostenible. Esta misión está encargada de llevarla a término la **Plataforma Europea de Adaptación Climática** (Climate-ADAPT, por sus siglas en inglés). CLIMATE-ADAPT es un consorcio entre la Comisión Europea y la Agencia Europea de Medioambiente (EEA, por sus siglas en inglés). La adaptación al cambio climático es una de las cinco misiones que se ha propuesto lograr la Comisión Europea junto con “ciudades inteligentes y con clima neutro”, “restaurar nuestros océanos y aguas”, “suelo, salud y alimentación” y “lucha contra el cáncer”. La plataforma Climate-ADAPT también se encarga del **Observatorio Europeo para el Clima** y la Salud. Esta iniciativa proporciona acceso a un amplio abanico de publicaciones, herramientas, portales web y otros recursos relacionados con el cambio climático y la salud. El **Explorador de Datos de Clima Europeo**, también desarrollado desde la plataforma Climate-ADAPT, da acceso interactivo a muchos índices climáticos de utilidad en el proceso de adaptación al cambio climático desde el Servicio de Cambio Climático Copernico. Otra iniciativa muy importante es la preparación desde 2022 del primer **Informe de Evaluación del Riesgo frente al Clima Europeo** (EUCRA, por sus siglas en inglés) por parte del Directorate-General for Climate Action de la Comisión Europea (DG CLIMA, por sus siglas en inglés) y la EEA. El Informe EUCRA, es un entregable, previsto para 2024, que evaluará los riesgos a los que está expuesto el medioambiente, la economía y la sociedad europea, asociados al cambio climático.

4.4. Marco nacional

El proceso de adaptación en España, como estado miembro de la Unión Europea está imbricado en el programa europeo. En enero de 2020 el Gobierno declaró el estado de emergencia climática y estableció la **Agenda para la Acción frente al Cambio Climático** (AACC) en la que se trazaron tres líneas de acción prioritarias (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020). Para llevar a cabo estas, el Gobierno elaboró una factura para la transición energética y cambio climático. Sin embargo, si se compara este último documento con el **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima** (NECP, por sus siglas en inglés), se observan diversas inconsistencias que muestran que en la AACC se marcan objetivos menos ambiciosos que en el NECP para 2021-2030, propuesto por España y remitido a la Comisión Europea. A título de ejemplo, se establece un 35 % de gasto en energías renovables frente al 42 % fijado en el NECP para 2030. También se ha delineado una estrategia de transición justa que, junto con la AACC y el NECP, conforman el marco estratégico de energía y clima en el que se vincula la descarbonización con la estrategia de energía circular.

Un informe reciente, elaborado por el Servicio de Investigación del Parlamento Europeo (EPRS, por sus siglas en inglés), sobre el avance en la implementación del programa de adaptación al cambio climático en España NECP (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021 y 2022) señala como datos comprobados hasta 2019 (Morgado Simões y Andreo Victoria, 2021):

- Población 47 millones de habitantes que supone el 10,5 % de la población de la EU.
- 7,1 Mt/habitante de emisiones de GEI equivalentes ($\text{MtCO}_2\text{-eq}$)¹, situándose por debajo del valor medio de la EU de 8,4 Mt.
- Entre 2005 y 2019 las emisiones/habitante se redujeron un 32 %, situándose por encima de la media de la EU de 22 %.
- El NECP prevé un 23 % de reducción en las emisiones, excluyendo las debidas al uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (LULUCF, por sus siglas en inglés) y la neutralidad energética en 2050.
- El sector LULUCF ha actuado como sumidero de CO_2 , principalmente la masa forestal, en ese periodo, contrarrestando las emisiones. Sin embargo, estos sumideros se saturarán, debido al cambio climático, si no se adoptan medidas adicionales tales como reforestación, prevención de incendios, y recuperación de ecosistemas. Se espera que estas medidas, junto con el incremento de sumideros por agricultura, eliminen 0,96 $\text{MtCO}_2\text{-eq}$ hasta 2030.
- En 2019 España reporta el mismo nivel de consumo de carbón que la media europea (272 g CO_2 €^{-1}), observándose una reducción de un 37 % desde 2005. Esta tendencia se asocia al cambio estructural producido en la economía, tras la crisis de 2009, que derivó hacia un modelo económico basado en los servicios, reduciendo los sectores industriales y de la construcción.
- Sectorialmente el transporte contribuyó en mayor proporción a las emisiones con un 27% en 2019, si bien experimentó una reducción de estas del 11,4 % desde 2005. El sector de la industria produjo el 16 % de las emisiones en 2019 y redujo las emisiones en un 56,8 % desde 2005. Los procesos industriales y el uso de productos fueron los siguientes contribuyentes a las emisiones con un 8 % en 2019, con descenso del 41,5 % desde 2005.
- Los sectores de la manufactura y la construcción contribuyeron con el 14 % en 2019, reduciendo las emisiones en un 34,4 % desde 2005.
- El sector de la gestión de emisiones (ETS, por sus siglas en inglés) cubre el 40 % del total de las emisiones mediante infraestructuras industriales y de generación de electricidad. Se espera que contribuya reduciendo en un 61 % las emisiones en 2030 mediante el incremento de los sistemas de generación de electricidad solar y eólica, hasta la cota 74% en 2030 y reduciendo hasta el 100 % en 2050.
- Desde 2005 se consiguió reducir las emisiones no asociadas a ETS en un 10 %. El NECP tiene como objetivo una reducción de las emisiones no-ETS en un 39 % en 2030, con una reducción del 18 % en emisiones agrícolas. Se espera desarrollar sistemas más eficientes de uso de fertilizante y producción de estiércol

¹ Tonelada métrica equivalente de dióxido de carbono.

mediante recogida selectiva de biomasa para ser usada como biofuel y compost; incremento de la recogida de aceite industrial destinado a la producción de biofuel y reducción de basura alimentaria. En el transporte se espera alcanzar una reducción del 28 % (27 MtCO₂) en 2030 mediante una transición de los vehículos de combustión a híbridos y eléctricos y con la creación de zonas de baja emisión en las ciudades con población por encima de los 50.000 habitantes mediante electrificación y uso de biofuel.

- El incremento de producción de energía renovable desde 2005 ha sido del 18,4 %. El objetivo del NECP para 2030 es llegar al 42 % mediante el incremento de la producción de energía eléctrica renovable y energía térmica. También se está planeando incorporar el uso de energía renovable basada en el hidrógeno.
- El NECP incluye una mejora de la eficiencia del 39,5 % en la edificación para 2030. Esta mejora espera conseguirse mediante el cambio en el modo de transporte, renovación de los edificios, mejora de los procesos industriales y reducción del consumo energético en granjas y explotaciones agrícolas.

Finalmente, la tabla 4.5. incluye las normas, ya publicadas, relacionadas con la adaptación al cambio climático en el marco de la Unión Europea.

Tabla 4.5. Normas ya publicadas relacionadas con la adaptación al cambio climático en el marco de la Unión Europea.

Norma	Descripción
UNE-EN ISO 14090:2020	Normas Vigente / 2020-02-05 Adaptación al cambio climático. Principios, requisitos y directrices (ISO 14090:2019).
UNE-CEN/CLC Guide 32:2016	Normas Vigente / 2016-05-01 Guía para la consideración de la adaptación al cambio climático en las normas (Ratificada por AENOR en mayo de 2016.)
ISO Guide 84:2020	Normas PUBLISHED / 2020-07-10 Guidelines for addressing climate change in standards.
UNE-EN ISO 14091:2021	Normas Vigente / 2021-07-07 Adaptación al cambio climático. Directrices sobre vulnerabilidad, impactos y evaluación de riesgos. (ISO 14091:2021).
UNE-ISO/TS 14092:2021	Normas Vigente / 2021-11-24 Adaptación al cambio climático. Requisitos y orientación sobre la planificación de la adaptación para los gobiernos locales y las comunidades.

UNE-CWA 17727:2022	Normas Vigente / 2022-11-30 Desarrollo de la resiliencia de las ciudades. Guía para combinar la gestión de riesgos de desastres y la adaptación al cambio climático. Zonas históricas.
DIN CWA 17300:2021-11	Normas Active / 2021-11 City Resilience Development-Operational Guidance; English version CWA 17300:2018.
DIN CWA 17301:2021-11	Normas Active / 2021-11 City Resilience Development-Maturity Model; English version CWA 17301:2018.
DIN CWA 17302:2021-11	Normas Active / 2021-11 City Resilience Development-Information Portal; English version CWA 17302:2018.
DIN EN ISO 26000:2021-04	Normas Active / 2021-04 Guidance on social responsibility (ISO 26000:2010); German version EN ISO 26000:2020.
ISO 14093:2022	Normas PUBLISHED / 2022-11-15 Mechanism for financing local adaptation to climate change-Performance-based climate resilience grants-Requirements and guidelines.
DIN/TS 35220:2021-12	Normas Active / 2021-12 Adaptation of standards to the impacts of climate change-Preconditions and implementation.
ISO 14097:2021	Normas PUBLISHED / 2021-05-04 Greenhouse gas management and related activities-Framework including principles and requirements for assessing and reporting investments and financing activities related to climate change.
DIN EN ISO 14067:2019-02	Normas Active / 2019-02 Greenhouse gases-Carbon footprint of products-Requirements and guidelines for quantification (ISO 14067:2018); German and English version EN ISO 14067:2018.
DIN EN ISO 14064-1:2019-06	Normas Active / 2019-06 Greenhouse gases-Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals (ISO 14064-1:2018); German and English version EN ISO 14064-1:2018.

DIN EN ISO 14064-2:2020-05	Normas Active / 2020-05 Greenhouse gases-Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements (ISO 14064-2:2019); German and English version EN ISO 14064-2:2019.
DIN EN ISO 14064-3:2020-05	Normas Active / 2020-05 Greenhouse gases-Part 3: Specification with guidance for the verification and validation of greenhouse gas statements (ISO 14064-3:2019); German and English version EN ISO 14064-3:2019.
ISO/DIS 14068	Normas DRAFT (ENQUIRY) / 2023-04-20 Greenhouse gas management and climate change management and related activities-Carbon neutrality.
IEC 60721-3-1:2019	Normas VIGENTE / 2019-05-22
IEC 60721-3-2:2019	Classification of environmental conditions-Part 3-3: Classification of groups of environmental parameters and their severities-Stationary use at weather protected locations.
IEC 60721-3-3:2019	
DIN ISO/TR 14073:2019-01; DIN SPEC 35806:2019-01	Normas Active / 2019-01 Environmental management-Water footprint-Illustrative examples on how to apply ISO 14046 (ISO/TR 14073:2017); Text in German and English.
DIN/TR 67702:2020-12	Normas Active / 2020-12 Information and documentation-Management of the environmental conditions for archive and library collections

4.5. Comunitat Valenciana

4.5.1. Marco general

A nivel regional y, en particular, en la Comunitat Valenciana (CV) se trabaja en estrecha colaboración con los organismos nacionales. En 2020 el Grupo de Trabajo sobre Impactos y Adaptación (CCPCC) elaboró las fichas de información sobre estrategias y actividades en materia de adaptación al cambio climático en las comunidades autónomas. En estas fichas se trazan las líneas de actuación y objetivos para 2030 (Grupo de Trabajo sobre Impactos y Adaptación, 2020). Esta ficha establece el marco común de trabajo para la elaboración de planes de actuación en las diferentes comunidades autónomas, para que los planes regionales elaborados en cada una de ellas mantengan la coherencia con el NECP y con el programa europeo. La figura 4.10 resume la estructura de la ficha.



Figura 4.10. Esquema de la ficha de información sobre estrategias y actividades en materia de adaptación al cambio climático en las comunidades autónomas.

Imbricada en el marco general para las regiones europeas fijado por la EU y en el marco nacional, se trazó la **Estrategia Valenciana de Cambio Climático y Energía 2030** (EVCCCE-2030) (Generalitat Valenciana, 2018). Se trata de un documento extenso que está estructurado en una serie de secciones que abarcan la sustentación, con evidencias científicas, del cambio climático y sus impactos adversos, el marco de políticas de energía y cambio climático a niveles internacional, europeo y nacional, los objetivos de la estrategia valenciana de cambio climático y energía y las medidas y actuaciones a llevar a término. Un resumen sumario de todo ello se puede encontrar en el Informe de l'Estratègia de Canvi Climàtic i Energia de la Comunitat Valenciana (Generalitat Valenciana, 2020a). Estos documentos se complementan con el documento Indicadores de Seguimiento 2020-2021 (Generalitat Valenciana, 2020b) y el Informe del Inventario de Emisiones de GEI Comunitat Valenciana Evolución y Situación Actual Datos 2020 (Generalitat Valenciana, 2020c).

La Comunitat Valenciana es una región particularmente vulnerable al cambio climático debido a una serie de factores singulares:

- Aumento de la temperatura en combinación con una reducción notable de las precipitaciones.
- Desertización del territorio.
- Aumento del nivel del mar.
- Aparición de especies invasoras nuevas, plagas y nuevas enfermedades.
- Incremento de la intensidad de fenómenos extremos como las olas de calor.

Para hacer frente a estas contingencias se adopta como estrategia conjunta la adaptación a los efectos adversos y la mitigación de las emisiones basada en acelerar la transición hacia una economía hipocarbónica, sostenible y competitiva y, en paralelo, la promoción de la educación ambiental de la ciudadanía, la concienciación de la sociedad de la necesidad de un cambio social basado en la sensibilización y en una modificación

en las costumbres y en las formas de producción, consumo, viajes, etc. Para coordinar esta estrategia se designa la **Comissió de Coordinació de Polítiques de Canvi Climàtic de la Comunitat Valenciana (CAPMA)**.

La estrategia a implementar se basa en los datos recabados a partir del análisis detallado de la situación socioeconómica y el impacto climático observado en la Comunitat Valenciana mediante una serie de estudios científicos. Para efectuar el análisis cualitativo y cuantitativo se establecen una serie de indicadores informatizados que están disponibles en la web de la Generalitat Valenciana (GVA) (Generalitat Valenciana, 2020a, b y c) para garantizar la transparencia del proceso.

4.5.2. Objetivos

Cuantitativamente y en términos más estrictamente energéticos el objetivo general es alcanzar un aumento de la eficacia energética de, al menos, el 32,5 %, y una cuota de la energía procedente de fuentes renovables de, al menos, el 32 % del consumo bruto de la energía de la UE en 2030.

Los objetivos específicos se agrupan en tres categorías tal como muestra la figura 4.11:

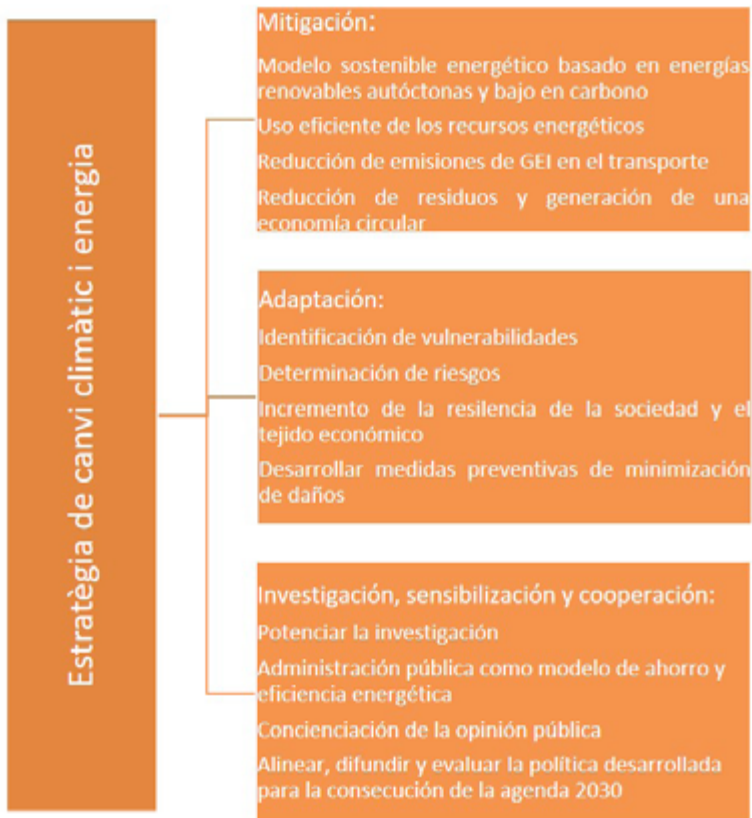


Figura 4.11. Objetivos de la EVCC-2030.

4.5.3. Situación actual

En la tabla 4.6 se resumen algunos indicadores globales de interés referidos a 2020 o al año más reciente del que se dispone de dato. Estos indicadores informan sobre la situación reciente en relación a las medidas adoptadas para hacer frente al cambio climático (Generalitat Valenciana, 2020b y 2020c):

Tabla 4.6. Indicadores de seguimiento 2020/2021 (Generalitat Valenciana, 2020b y 2020c).

Indicador	Año	Valor (%)
Emisiones de gases de efecto invernadero per cápita	2018	6,07
Participación de las energías renovables sobre el consumo final bruto de energía	2019	12,4
Participación de las energías renovables sobre la producción eléctrica final	2019	19,5
Dependencia del petróleo	2019	37,7
Tasa de captura de CO ₂ por la vegetación forestal (tCO ₂ /ha por año)	2020	2,49

4.6. Referencias

AEMET y OECC (2021) *Cambio Climático: Bases Físicas*. Guía Resumida del Sexto Informe de Evaluación del IPCC. Grupo de Trabajo I. Agencia Estatal de Meteorología y Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, Madrid. Basado en materiales contenidos en el IPCC AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/ipcc-guia-resumida-gt1-bases-fisicas-ar6_tcm30-533081.pdf. [Consultado 6-05-2023].

Comisión Europea (2021) *Forjar una Europa resiliente al cambio climático-La nueva estrategia de adaptación al cambio climático de la UE*. Comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0082>. [Consultado 23-04-2023].

Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. y Tanabe, K. (2006) *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (2006)*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/0_Overview/V0_0_Cover.pdf. [Consultado 6-05-2023].

Generalitat Valenciana (2018) *Estrategia Valenciana de Cambio Climático y Energía. 2030*. Disponible en: <https://agroambient.gva.es/web/cambio-climatico>. [Consultado 23-04-2023].

Generalitat Valenciana (2020a) *Informe de l'estratègia de canvi climàtic i energia de la Comunitat Valenciana*. Disponible en: <https://agroambient.gva.es/web/cambio-climatico>. [Consultado 23 abril 2023].

Generalitat Valenciana (2020b) *Indicadores de seguimiento 2020-2021*. Disponible en: <https://agroambient.gva.es › web › cambio-climatico>. [Consultado 23-04-2023].

Generalitat Valenciana (2020c) *Informe del inventario de emisiones de GEI Comunitat Valenciana evolución y situación actual datos 2020*. Disponible en: <https://agroambient.gva.es › web › cambio-climatico>. [Consultado 23-04-2023].

Grupo de Trabajo sobre Impactos y Adaptación (CCPCC) (2020) *Ficha de información sobre estrategias y actividades en materia de adaptación al cambio climático en las comunidades autónomas*. Disponible en: <https://transparencia.gob.es › transparencia › dam>. [Consultado 23-04-2023].

Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023.

Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. [Consultado 5-05-2023].

Masson-Delmotte, V. et al. (2020) *Informe especial sobre el cambio climático y la tierra*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf. [Consultado 6-05-2023].

Masson-Delmotte, V. et al., (2019) *Informe Especial sobre Calentamiento Global de 1,5 °C*. Working Group I. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf. [Consultado 6-05-2023].

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014) *Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC grupo de trabajo II*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contr-el-cambio-climatico/guia-resumida-gt2-impactos-adaptacion-vulnerabilidad-ar5_tcm30-177778.pdf. [Consultado 23-04-2023].

Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020) *Plan de acción para la implementación de la agenda 2030. Hacia una Estrategia Española de Desarrollo Sostenible*. Disponible en: <https://transparencia.gob.es › transparencia › dam>. [Consultado 23-04-2023].

Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2021) *Programa de trabajo 2021-2025. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/pt1-pnacc_tcm30-535273.pdf. [Consultado 23-04-2023].

Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2022) *Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Guía resumida del sexto informe de evaluación del IPCC grupo de trabajo II*. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/ipcc-guia-resumida-gt2-imp-adap-vulnar6_tcm30-548667.pdf. [Consultado 23-04-2023].

Morgado Simões, H. y Andreo Victoria, G. (2021) *Climate action in Spain. Latest state of play. EU progress on climate action –How are the Member States doing?* European Parliamentary Research Service. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu › thinktank › document>. [Consultado 24-04-2023].

Naciones Unidas (2015) Acuerdo de París. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/elementos-acuerdo-paris>. [Consultado 26-04-2023].

Naciones Unidas (1992) Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Disponible en: <https://unfccc.int/docs/convkp/convsp>. [Consultado 26-04-2023].

OECC (2022a) *Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad*. Guía Resumida del Sexto Informe de Evaluación del IPCC. Grupo de Trabajo II. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid. Basado en materiales contenidos en el IPCC AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/ipcc-guia-resumida-gt2-imp-adap-vuln-ar6_tcm30-548667.pdf. [Consultado 6-05-2023].

OECC (2022b) *Mitigación del Cambio Climático. Guía Resumida del Sexto Informe de Evaluación del IPCC. Grupo de Trabajo III*. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid. Basado en materiales contenidos en el IPCC AR6 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/ipcc-guia-resumida-gt3-mitigacion-ar6_tcm30-549165.pdf. [Consultado 6-05-2023].

Pörtner, H.-O., et al., Eds. (2019) *Informe especial sobre el océano y la criosfera en un clima cambiante*. Unidad de Apoyo Técnico del Grupo de Trabajo II. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2020/07/SROCC_SPM_es.pdf. [Consultado 6-05-2023].

UNESCO (2020) *Integración de la Acción para el Empoderamiento Climático en las Contribuciones determinadas a nivel nacional*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Disponible en: <https://unfccc.int/default/files/resource>. [Consultado 23-04-2023].

4.7. Bibliografía

Amblar Francés, P., Casado Calle, M.J., Pastor Saavedra, A., Ramos Calzado, P. y Rodríguez Camino, E. (2017) *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5*. Ministerio de Agricultura Pesca, Alimentación y Medioambiente. Disponible en: https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/Guia_escenarios_AR5. [Consultado 23-04-2023].

Campos Rodrigues, L.M., Puig Ventosa, I. y Sastre Sanz, S. (2016) *Adaptación al Cambio Climático de Zonas Urbanas Costeras con Elevada Densidad de Población e Interés Turístico y Cultural en España*. Fundació ENT. Disponible en: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/countries-regions/countries/spain>. [Consultado 24-04-2023].

De Castro, M., Martín-Vide, J. y Alonso, S. (2005) *The climate of Spain: past, present and scenarios for the 21st century. Past, present and future climate*. Ministerio de Transición Ecológica. Disponible en https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/01_The%20climate%20of%20Spain_ing_tcm30-178515.pdf. [Consultado 24-04-2023].

European Climate Adaptation Platform Climate (ADAPT) (2009) ENSEMBLE final report. Disponible en: <https://climate-EuropeanClimateadapt.eea.europa.eu/en/metadata/publications/ensembles-final-report>. [Consultado 16-04-2023].

European Commission (2020) Assessment of the final national energy and climate plan of Spain, SWD (2020) 908 final. Disponible en: <http://energy.ec.europa.eu>. [Consultado 24-04-2023].

Gobierno de España (2020) Integrated National Energy and Climate Plan 2021-2030. Disponible en: <http://energy.ec.europa.eu>. [Consultado 24-04-2023].

Gómez Royuela, M. (2016) *Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector turístico*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/impactosvulnerabilidadyadaptacionalcambioclimaticoenelsectorturistico_tcm30-178443.pdf. [Consultado 16-04-2023].

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medioambiente (2017) *Adaptación al Cambio Climático de Zonas Urbanas Costeras con Elevada Densidad de Población e Interés Turístico y Cultural en España*. The European Climate Adaptation Platform Climate-ADAPT is a partnership between the European Commission and the European Environment Agency. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/countries-regions/countries/spain>. [Consultado 16-04-2023].

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2019) Environmental Profile of Spain 2019, 2020. Disponible en: <http://energy.ec.europa.eu>. [Consultado 24-04-2023].

Parte 2

Cambio climático y patrimonio ferrotraviario valenciano

Capítulo 5: El clima de la Comunitat Valenciana

Contenidos

- 5.1. El clima en el suroeste de Europa
- 5.2. El clima de la península ibérica en el pasado
 - 5.2.1. Periodo Romano
 - 5.2.2. La Alta Edad Media
 - 5.2.3. La Anomalía Climática Medieval
 - 5.2.4. La Pequeña Edad de Hielo
 - 5.2.5. Calentamiento Global
- 5.3. El clima de la península ibérica en el momento presente
 - 5.3.1. Temperatura
 - 5.3.2. Precipitaciones
 - 5.3.3. Radiación solar
 - 5.3.4. Nubosidad
 - 5.3.5. Humedad del aire
 - 5.3.6. Presión atmosférica
 - 5.3.7. Viento
- 5.4. La especificidad de la Comunitat Valenciana
 - 5.4.1. Los climas en el territorio
 - 5.4.2. El clima marino
- 5.5. Referencias
- 5.6. Bibliografía

En este capítulo se resumen los principales datos recopilados a partir de una exhaustiva revisión bibliográfica de publicaciones especializadas en materia de meteorología y climatología de la Comunitat Valenciana en relación al cambio climático. Esta información ha servido de base para determinar las tendencias recientes del clima y sus diferencias a lo largo de la geografía de la Comunitat Valenciana, que se mostrarán en los capítulos 8 y

9. Estos han sido algunos de los resultados obtenidos en este proyecto I+D, con los datos experimentales obtenidos y la consulta de bases de datos meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y de calidad del aire de la Red Valenciana de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica de la Generalitat Valenciana.

5.1. El clima en el suroeste de Europa

La circulación atmosférica experimenta variaciones a consecuencia de cambios en los forzamientos externos y a causa de las interacciones internas entre componentes del sistema climático global. La variabilidad atmosférica, en escalas superiores a la estacional, está organizada en estructuras espaciales preferentes denominadas **patrones de teleconexión** (PT) que se forman a partir de procesos ondulatorios. Los PT ponen de manifiesto conexiones con otros componentes del sistema climático como el océano y anomalías en centros de acción o sistemas de circulación climatológicos regionales. Los PT varían en intensidad y localización y tienen gran impacto en la temperatura y las precipitaciones.

El PT más importante que afecta a la península ibérica es la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés) que se produce a consecuencia de modificaciones en el gradiente meridional entre los sistemas de baja presión subpolar y el anticiclón de las islas Azores (figura 5.1). Este último, es un sistema de presión anticiclónico subtropical que sufre desplazamientos meridionales a lo largo del ciclo estacional. Las fases positivas de la NAO producen un incremento de la precipitación en el norte de Europa y una reducción en el suroeste. Este PT tiene influencia en los patrones de temperatura en superficie, precipitaciones y vientos. Las combinaciones de la NAO con otros PT explican la variabilidad del clima en el suroeste de Europa. Entre los PT con mayor influencia sobre la NAO cabe destacar el PT del Este Atlántico (EA, por sus siglas en inglés) y el de Escandinavia (SCAND, por sus siglas en inglés) junto con la Oscilación del Mediterráneo (MO, por sus siglas en inglés) y la Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO, por sus siglas en inglés), estos dos últimos considerados desde una perspectiva más regional.



Figura 5.1. Esquema de las oscilaciones que exhibe la NAO (NAO+) y (NAO -).

Otros fenómenos y PTs con influencia en las modificaciones de los gradientes meridionales de presión y, por ende, en el clima de la península ibérica son (Rodríguez-Fonseca *et al.*, 2017):

- La relación no estacionaria entre la NAO de invierno y la precipitación en Europa se ha asociado a variaciones en la actividad solar, en la localización de los centros de la NAO, a fluctuaciones de los gradientes meridionales de presión, a interacciones el Atlántico Norte de tipo aire-oceano y a interacciones en la Circulación Meridional Profunda en el Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés).
- Modulación invernal de la NAO por El Niño/La Niña (ENSO, por sus siglas en inglés), en particular, por la ENSO del Pacífico del Este (EP, por sus siglas en inglés) y por la ENSO del Pacífico Central (CP, por sus siglas en inglés), a través de la troposfera y de la estratosfera.
- Modulación primaveral de la NAO, que adopta una fase negativa y a cambios de baja frecuencia en el estado base del océano.
- La Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) condiciona la efectividad de la teleconexión ENSO. La variabilidad del PT del Atlántico Norte Tropical (TNA, por sus siglas en inglés) junto con ENSO también condiciona la circulación atmosférica en el sector euro-atlántico y, específicamente, en la península ibérica, a principios de invierno y primavera.
- El Niño del Atlántico, durante su fase de decaimiento, también ejerce cierta influencia directa sobre la parte septentrional de Europa y el Mediterráneo.

5.2. El clima en la península ibérica en el pasado

El estudio del clima en el pasado es importante pues puede permitir una mejor predicción de los escenarios futuros a lo largo del siglo XXI. Por ejemplo, la comparación de periodos cálidos del pasado con el clima actual puede facilitar la evaluación del impacto de las actividades antrópicas y de la variabilidad climática natural en el cambio climático.

La evolución del clima, reconstruida en la península ibérica para los últimos 2.000 años, se ha explicado basándose en las fluctuaciones de los modos climáticos, en particular la NAO, en la actividad solar y las erupciones volcánicas. Otro factor de influencia es la interacción entre modos climáticos, por ejemplo, el acoplamiento y desacoplamiento entre la NAO y la EA o la SCAND, y la evolución de dicha interacción, que puede comportar cambios en los patrones espaciales de la temperatura y de la precipitación de invierno. La interacción de la NAO y la EA con el mismo u opuesto signo puede generar homogeneidad o heterogeneidad en las distribuciones espaciales de los indicadores climáticos. La precipitación invernal en la península viene determinada por la NAO, mientras que la EA controla la variabilidad térmica estival e invernal. La fase positiva (negativa) de la NAO provoca el descenso (aumento) en la precipitación de invierno. La fase positiva (negativa) de la EA produce un aumento (disminución) en las temperaturas de invierno y verano.

La evolución del clima en la península ibérica en los últimos 2000 años ha sido compleja tanto en la dimensión espacial como temporal. Desde la perspectiva temporal, pueden distinguirse cuatro periodos climáticos principales caracterizados por patrones distintivos de temperatura y precipitación (Giralt *et al.*, 2017) (figura 5.2):

- Periodo Romano (PR, ca. 250 AC-500 AD).
- Alta Edad Media (Primera Edad Medieval) (AEM,500-900 AD).
- Anomalía climática medieval (ACM, 900-1300 AD).
- Pequeña Edad de Hielo (PEH, 1300-1850 AD).

A estos periodos les seguiría:

- Calentamiento Global (1850 AD-actualidad).

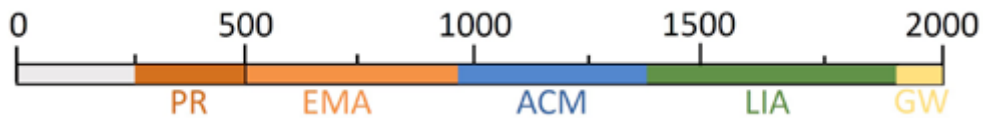


Figura 5.2. Las cuatro etapas climáticas en la península ibérica durante los últimos 2000 años.

5.2.1. Periodo Romano

Este período es considerado el período más cálido habido durante los últimos 2000 años, debido a la elevación de la temperatura superficial del mar Mediterráneo y del océano Atlántico. La cadena pirenaica experimentó un calentamiento progresivo mientras que la meseta exhibió una alternancia de períodos fríos y cálidos en intervalos de décadas o centurias. En el sur de la península la humedad era elevada mientras que en el norte era escasa y en el centro se alternaron períodos húmedos y áridos. El clima también variaba de las zonas de alta montaña a las de baja altitud siendo húmedo y árido, respectivamente. Estos gradientes latitudinales y altitudinales podrían asociarse a la variabilidad regional pluviométrica. El gradiente de humedad durante el PR estuvo causado por la interacción predominante de los modos climáticos de la NAO y el EA en las fases de signo opuesto (NAO+)-(EA-) y (NAO-)-(EA+).

5.2.2. La Alta Edad Media

En este periodo el clima de la península ibérica se caracteriza por tener unas condiciones térmicas homogéneas y más frías que en el periodo anterior. El gradiente atlántico-mediterráneo predomina en términos de humedad, lo que conlleva un clima en el noroeste de la península frío y húmedo. Por el contrario, en la región oriental predomina el ambiente árido al disminuir el balance entre evaporación y precipitación en toda el área mediterránea. Al igual que en el PR, el gradiente de humedad en este periodo está causado por la interacción predominante de los modos climáticos de la NAO y el EA.

5.2.3. La Anomalía Climática Medieval

En toda la península se mantuvieron las condiciones cálidas. La primera mitad de este periodo se caracterizó por unos inviernos cálidos y primaveras y otoños fríos, y abundantes tormentas, mientras que en la segunda mitad se incrementó la aridez en las primaveras y otoños, en particular, en la zona mediterránea (Comunitat Valenciana) y del mar de Alborán. La aridez adquirió mayor intensidad en el interior, desde el norte hasta el sur, y en la meseta

central. La distribución homogénea de la precipitación en este periodo fue causada por la interacción (NAO+)-(EA+), resultando inviernos cálidos y secos y veranos cálidos. Una segunda causa sería la variación en la intensidad de la radiación solar, determinante del modo climático SCAND, lo que explicaría el descenso significativo de las precipitaciones observado en el noroeste y las bajas temperaturas de la superficie del mar en el sur.

5.2.4. La Pequeña Edad de Hielo

La temperatura fue disminuyendo progresivamente con una tendencia de enfriamiento de 3 °C, alcanzando condiciones térmicas más frías y más húmedas que en periodos precedentes y con oscilaciones más frecuentes debidas, probablemente, a un incremento anómalo de los frentes fríos que alcanzaban la península por el noroeste en las estaciones más cálidas. Las condiciones climáticas de este período estuvieron causadas por la interacción (NAO-)-(EA-), dando lugar a inviernos húmedos y fríos y veranos fríos.

5.2.5. Calentamiento Global

En los últimos 150 años se ha producido un paulatino incremento en la temperatura acompañado de una disminución de las precipitaciones como consecuencia de las actividades antropogénicas asociadas a la revolución industrial. Térmicamente la tendencia se dirige hacia unas condiciones cada vez más cálidas y áridas en toda la península.

5.3. El clima de la península ibérica en el momento presente

Tal como se ha descrito en los apartados precedentes, algunos de los principales modos climáticos del hemisferio norte, tales como NAO, EA y SCAND controlan, por su ubicación geográfica, el clima de la península ibérica. Resultante de ello, el clima en la península y las islas Baleares se reparte entre dos regiones climáticas diferentes, la **región Eurosiberiana** caracterizada por su clima frío y húmedo, sin estiaje marcado (norte y noroeste de la península), y la **región Mediterránea**, caracterizada por unos inviernos frescos y húmedos y una sequía estival muy acentuada. A lo largo de su historia el país ha experimentado una evolución climática que ha conformado las condiciones iniciales para las proyecciones futuras del clima.

La variabilidad en la dimensión espacial del clima de la península ibérica es comprensible por su diversidad orográfica, que genera múltiples microclimas. Cabe destacar la meseta central segmentada y bordeada por diversas sierras y cadenas montañosas, con picos por encima de los 2.000 m de altitud. Por otra parte, está la extensa costa que da lugar a regiones costeras extensas. Estas características geográficas generan gradientes norte-sur y oeste-este con la particularidad de ser decrecientes en precipitación y crecientes en temperatura. Las interacciones entre estos regímenes provocan microclimas diversos y sensibles, en mayor o menor grado temporal y espacial, a los principales modos climáticos (Sánchez *et al.*, 2017).

En las revisiones realizadas por Vicente y Rodríguez (2017), De Castro *et al.* (2005) y Montávez *et al.* (2017) se describe el comportamiento de diversos parámetros desde el último cuarto del siglo XX: radiación solar, insolación, nubosidad, temperatura del aire,

vientos de superficie, humedad atmosférica, presión, precipitación y demanda de agua por parte de la atmósfera. Seguidamente se resumen las principales conclusiones a las que llegan estos autores.

5.3.1. Temperatura

Se observa una tendencia creciente en la temperatura media anual entre 0,1-0,2 °C década⁻¹ y en la temperatura máxima de 0,3 °C década⁻¹, más acentuada en los meses de primavera y verano. La temperatura máxima tiende a incrementarse a finales de invierno y principios de primavera y verano, mientras que la temperatura mínima se incrementa en verano, primavera y otoño. La tendencia espacial en la temperatura diaria tiene un gradiente norte-sur durante el verano. En la región mediterránea, la temperatura media en el período 1971-2000 fue de 15 °C (Cataluña) a 18 °C (Almería); en la meseta central entre 10 y 15 °C; 16 °C en Extremadura; 14 °C en Cantabria y de 17 a 18 °C en el valle del Guadalquivir (figura 5.3). Estas variaciones en sentido norte-sur y de una región a otra, resultan en un gradiente latitudinal de 1 °C 200 km⁻¹.

En relación a eventos extremos, cabe señalar que la cantidad de días con temperaturas extremas cálidas ha ido incrementándose durante las últimas dos décadas. En el período 1971-2000 se observaron temperaturas superiores al umbral 40 °C en diversas ciudades de Andalucía y, menos frecuentemente, en Castilla-La Mancha, Extremadura y Murcia. Más raramente se observaron en Navarra, La Rioja, Aragón, Comunitat Valenciana, Mallorca, Rías Bajas, Madrid, Bilbao, Tenerife e interior de Cataluña y Orense. En Castilla-La Mancha, Castilla y León se registraron valores extremos por debajo de -20 °C y por debajo de -10 °C en el valle del Ebro, Granada, Guipúzcoa, interior de Galicia y Cataluña. Como hitos históricos recientes, cabe mencionar el valor -32 °C alcanzado en los Pirineos aragoneses en febrero de 1956.

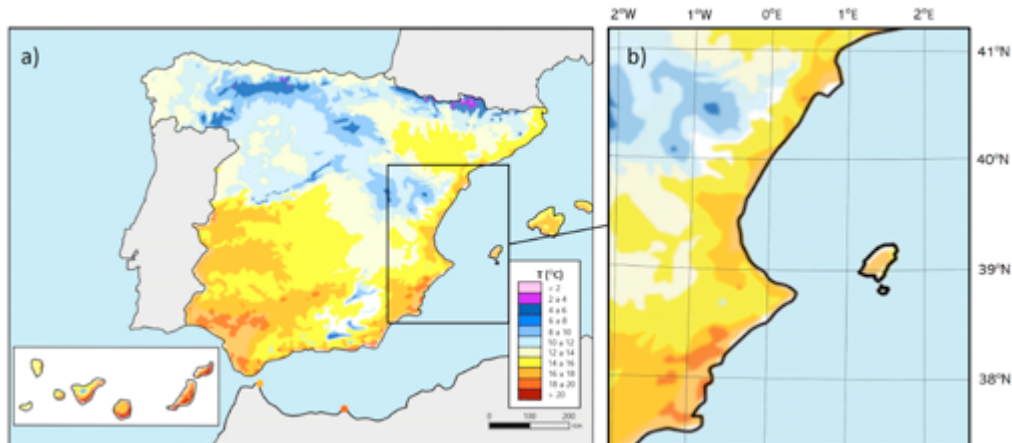


Figura 5.3. a) Representación de las temperaturas medias en el periodo 1971-2000; b) detalle de la Comunitat Valenciana. Adaptado del Instituto Nacional de Meteorología.

5.3.2. Precipitaciones

El volumen de precipitaciones es una de las variables climáticas de mayor interés,

no solo por caracterizar el clima sino por ser considerada la lluvia y la nieve recursos naturales de gran importancia. Atendiendo al régimen de precipitaciones, De Castro *et al.* (2005) discriminan tres tipos de clima: lluvioso en las zonas situadas por encima de la curva isohieta¹ 800-600 mm año⁻¹, que principalmente se sitúan en la mitad norte de la península y las zonas montañosas. Tipo seco, en zonas situadas entre las isohietas 600-800 mm año⁻¹ y 300-350 mm año⁻¹, que comprende el centro de la península, los vales del Ebro y el Guadalquivir y gran parte del levante peninsular y el Atlántico sur. Por último, el tipo semiárido se registra en las zonas situadas por debajo de la isohieta 300-350 mm año⁻¹ que se sitúan en el sudeste mediterráneo. En relación a eventos extremos y adversos, la intensidad de la lluvia puede llegar a ser elevada en muchas partes del país y, en particular, en el área mediterránea² (De Castro *et al.*, 2005).

La variación temporal del régimen de precipitaciones tiene interés efectuarla a tres niveles: anual, estacional e interanual. Respecto al primero de ellos, el volumen medio anual durante 1961-1990 fue de 327,286 x10⁶ m³, a una altura media de 665 m. El valor mínimo se observó en el cabo de Gata con 125-150 mm mientras que en las zonas lluviosas alcanzó los 2.500 mm.

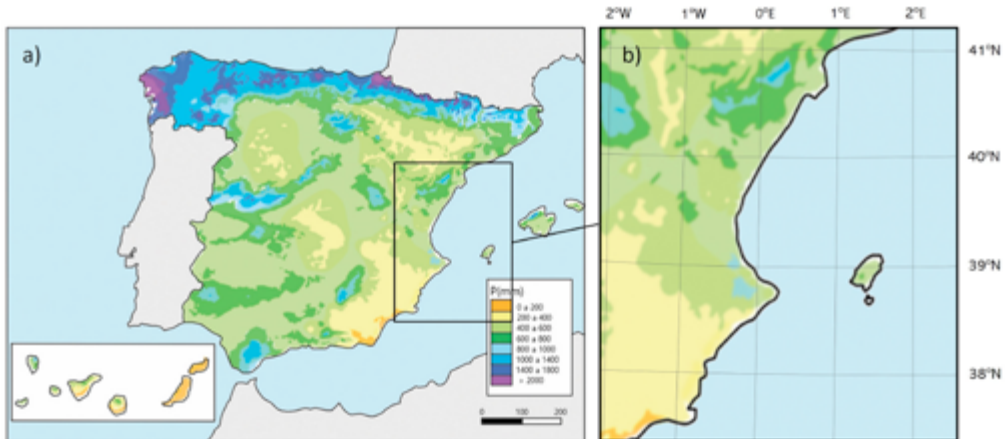


Figura 5.4. Representación de las precipitaciones medias en el periodo 1971-2000. Adaptado del Instituto Nacional de Meteorología.

En relación al régimen estacional de precipitaciones cabe establecer diferentes tipologías en función de la localización y la altitud. Siguiendo el criterio de Martín-Vide y Olcina (2001), estos regímenes varios pueden agruparse en cuatro tipos principales con alternancia en las estaciones que reportan los máximos y mínimos de precipitaciones, como se indica en la figura 5.5.

Finalmente, el régimen interanual de precipitaciones de la península ibérica se caracteriza por su gran variabilidad. Estableciendo un umbral del 20 % de variabilidad interanual la península queda dividida en dos zonas con climatología distinta, la parte atlántica y central de la península y la mediterránea y marina de latitud media en la

¹ La curva isohieta o isoyeta, en un mapa cartográfico, es el lugar geométrico de los puntos que registran un mismo volumen de precipitación referido a una determinada unidad de tiempo.

² El 3 de noviembre de 1987 se registraron 817 mm en Oliva en un solo día (De Castro *et al.*, 2005).

costa oeste. En relación a la frecuencia de los eventos con precipitación hay una clara disminución. Sin embargo, la frecuencia en el número total de días con precipitación escasa se ha venido incrementando generalizadamente en la península durante las últimas décadas en todas las estaciones del año (figura 5.4).

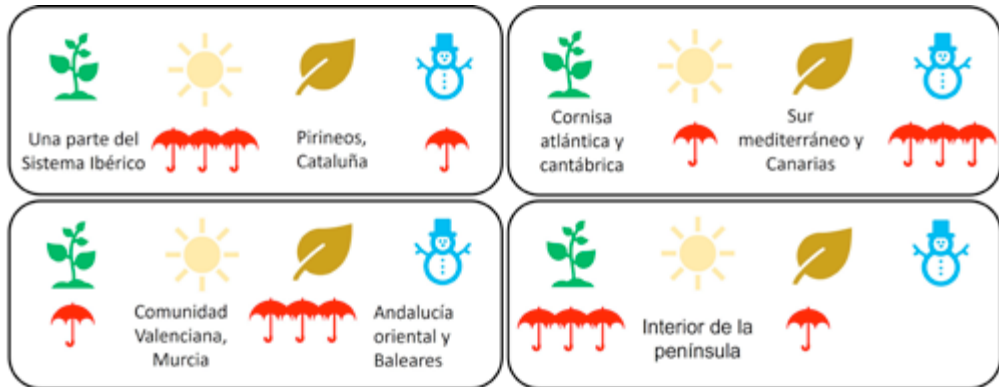


Figura 5.5. Diferentes regímenes estacionales de precipitaciones. De izquierda a derecha primavera, verano, otoño e invierno.

La nieve, en términos generales, puede considerarse un fenómeno poco frecuente, siendo la altitud el factor más determinante. El número de días se incrementa en la mitad norte de la península en cotas por encima de los 1800 m y en la mitad sur por encima de 2000 m. El granizo tampoco es un fenómeno meteorológico frecuente con un promedio de menos de cinco días al año, siendo el norte de la península la región más afectada.

5.3.3. Radiación solar

La **radiación solar** global media diaria ha oscilado entre 12 MJ m⁻² en Cantabria y País Vasco y 18 MJ m⁻² en Andalucía y Canarias con máximos y mínimos absolutos de 25 MJ m⁻² y 5 MJ m⁻², respectivamente. Los máximos anuales tienen lugar en los meses de junio y julio, registrándose valores de hasta 25 MJ m⁻² en algunos puntos del sur de la península. Los principales rasgos de la evolución del régimen de radiación solar en las últimas décadas pueden resumirse en una tendencia ascendente significativa, del orden de ~ 4 W m⁻² década⁻¹, con el mayor crecimiento durante el verano. Este aumento se asocia con una disminución de la nubosidad (De Castro *et al.*, 2005).

Tanto los valores extremos como los valores medios de **insolación** presentan variaciones dependiendo de la localización, principalmente, latitudinal. Los valores extremos reportados son 3.448 horas de sol año⁻¹ en atmósfera clara por encima de la capa de nubes en el observatorio de Izaña, en Canarias, y 1.525 horas de sol año⁻¹ en el aeropuerto de Bilbao. Solamente Asturias, Cantabria, País Vasco, Galicia y Pirineos están por debajo del umbral fijado en la isopleta³ de 2.000 horas de sol año⁻¹ que permite cubrir las necesidades domésticas con energía solar (De Castro *et al.*, 2005).

³ La curva isopleta, en un mapa cartográfico, es el lugar geométrico de los puntos que registran un mismo volumen de una cierta variable, referido a una determinada unidad de tiempo.

5.3.4. Nubosidad

El número medio anual de días claros es de 25,8 en observatorios del País Vasco y 155,8 en Andalucía o 176,2 en Canarias (De Castro *et al.*, 2005). El número medio anual de días cubiertos alcanza un máximo de 170 en el País Vasco y 53,3 en Andalucía (De Castro *et al.*, 2005).

5.3.5. Humedad del aire

Los valores medios de valor de humedad relativa (HR) reportados en las últimas décadas oscilan alrededor del 70 % en Galicia y Asturias, Cantabria, País Vasco, Pirineos, norte de Castilla y León, Baleares, noreste de Cataluña, costa de Murcia, Cádiz, Ceuta, Melilla y Canarias. Los valores extremos para este mismo periodo decadal fueron 88 % en Ceuta y 49 % en Tenerife. En las zonas del interior el valor de HR varía de 80 % en invierno a 40 % en verano mientras que en las zonas costeras la variación es inferior al 15 %. Se ha observado una notable disminución de la HR en la península ibérica en las últimas décadas, experimentando un promedio de $-5,1 \text{ \% año}^{-1}$. Este descenso se produce, principalmente, en primavera y verano ($-1,02 \text{ \%}$ y $-1,56 \text{ \% década}^{-1}$, respectivamente) (Vicente-Serrano *et al.*, 2014a; De Castro *et al.*, 2005).

De manera concomitante con la disminución de la HR y el incremento de la temperatura se ha observado un incremento de la demanda de agua atmosférica⁴ del orden de 24,4 mm década^{-1}) (Vicente-Serrano *et al.*, 2014b).

5.3.6. Presión atmosférica

La presión atmosférica presenta su valor máximo en invierno y el más bajo en primavera. Ello es debido al intenso calentamiento del aire en verano, que hace caer la presión en el interior peninsular (1,015-1,017 hPa), mientras las altas presiones asociadas al anticiclón de las Azores se mantienen en la cornisa cantábrica (1,020 hPa) (De Castro *et al.*, 2005).

5.3.7. Viento

La orografía y el carácter insular de algunas regiones determina la existencia de vientos de carácter regional y local que, obviamente, serán determinantes del clima de las zonas de influencia. Entre los vientos regionales de mayor impacto cabe destacar el viento del noroeste, viento del norte, viento del este, viento del suroeste y viento del oeste. Las brisas costeras son también una característica del régimen de vientos en las zonas de costa. Los valores máximos alcanzados en las últimas décadas son de 200 km h^{-1} en Canarias, si bien en la mayoría de observatorios a lo largo del territorio nacional se ha podido registrar en algún momento valores por encima de los 100 km h^{-1} .

La velocidad del viento ha mostrado una tendencia generalizada descendente de $-0,016 \text{ m s}^{-1} \text{ década}^{-1}$, en las últimas décadas, en la mayoría del territorio nacional (en torno al

⁴ La demanda de agua atmosférica es definida como la cantidad de agua contenida en la atmósfera en una determinada región del planeta. Esta cantidad de agua depende de factores tales como la temperatura, la humedad relativa y la intensidad del viento. En general, la demanda de agua aumenta con el incremento de la temperatura y la velocidad del viento y disminuye con la humedad relativa.

80-60 %), (Azorín-Molina *et al.*, 2014). A nivel estacional, no obstante, se observa un cambio de la tendencia decreciente en invierno y primavera y creciente en verano y otoño.

5.4. La especificidad de la Comunitat Valenciana

5.4.1. Los climas en el territorio

La pequeña extensión del territorio de la Comunitat Valenciana hace que las diferencias climáticas entre las diferentes comarcas no sean muy marcadas. A pesar de esto, atributos geográficos tales como la altitud, la localización interior o costera o la orografía, permiten discriminar regiones dentro del territorio con características climáticas diferenciadas. Pérez Cueva (1994) ha realizado una clasificación de los climas de la Comunitat Valenciana. Según esta se pueden distinguir ocho zonas climáticas, tal como muestra la figura 5.6 (Rivera, 2014).

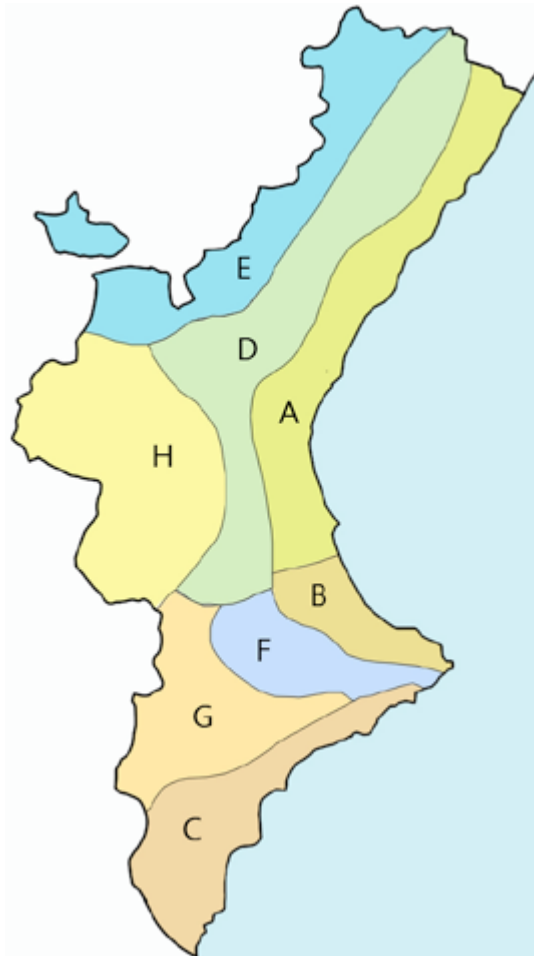


Figura 5.6. Zonas climáticas en la Comunitat Valenciana. Adaptado de Rivera (2014).

- *Zona A o Llanura litoral septentrional*: el clima en esta zona se caracteriza por tener una temperatura media anual en el intervalo 16-18 °C. La estacionalidad se caracteriza por los inviernos suaves (10 °C)⁵ y los veranos cálidos (25 °C). Las precipitaciones medias anuales se incrementan al desplazarse de sur a norte y se sitúan en valores de 450 L m⁻², exhibiendo su máximo en otoño y, menos acentuado, en primavera. El ciclo estival tiene una duración de cuatro meses con muy escasas precipitaciones y con una elevada humedad relativa asociada a un régimen de brisas muy constante que aminora las temperaturas y favorece un ambiente de bochorno muy característico.
- *Zona B o llanura litoral lluviosa*: Presenta una temperatura media ligeramente superior a la de la zona A, por su situación más meridional. Las precipitaciones anuales se sitúan entorno a los 650 L m⁻², con el máximo en otoño seguido de la primavera. Presenta una estación seca muy marcada. El incremento de las precipitaciones es debido a la orientación de la costa perpendicular a los flujos de viento del NE que generan procesos de ciclogénesis mediterránea o “gota fría”.
- *Zona C o sector litoral meridional*: Esta zona exhibe las temperaturas anuales medias más elevadas de toda la Comunitat Valenciana con un valor de 18 °C. Las precipitaciones son escasas con un valor medio de 300 L m⁻². Este carácter más seco se explica por la orientación a sotavento de los flujos de viento del NE.
- *Zona D o franja de transición*: Esta zona del prelitoral presenta un clima de transición entre las zonas litorales y las interiores. La temperatura media es de 15 °C, con variaciones diarias mayores que en las zonas litorales. Las precipitaciones presentan un valor medio de 550 L m⁻². El valor máximo se alcanza en primavera a causa de la mayor influencia de los flujos de viento del oeste. En el estío se incrementan las tormentas.
- *Zona E o montaña del NW*: esta zona se caracteriza por presentar el régimen de precipitaciones más regular y abundante junto con períodos secos menos acusados y por exhibir las temperaturas más bajas de la Comunitat Valenciana. Este clima es debido a la confluencia de mayor altitud y latitud y su localización alejada del mar. La temperatura media anual se sitúa en los 10-11 °C. Presenta las precipitaciones más cuantiosas con un valor medio de 650 L m⁻², con máximos pluviométricos en primavera y otoño y periodo estival relativamente fresco y húmedo. Este régimen es debido a la coexistencia de precipitaciones por flujos zonales del oeste, temporales causados por vientos del este (temporales de levante) y tormentas de origen convectivo. Son frecuentes las heladas en un largo periodo del año, y la nieve tiene una presencia importante.
- *Zona F o fachada lluviosa del macizo de Alcoi*: Esta zona se sitúa en la vertiente norte del extremo oriental de la cordillera Bética. La temperatura media anual es de 14-15 °C. Su particular localización geográfica le confiere un clima similar al de la llanura litoral lluviosa con un valor medio de precipitaciones de 600 L m⁻², con el máximo situado en el otoño seguido de la primavera y el invierno y un verano seco.

⁵ Las cifras dadas en este apartado corresponden a valores medios reportados en la bibliografía.

- *Zona G o vertiente seca del macizo de Alcoi*: La temperatura media anual es ligeramente superior, a igualdad de altitud, que en la zona F, a causa de la menor nubosidad. El valor medio de precipitaciones oscila entre 450 L m⁻² en la parte alta y 300 L m⁻² en la parte baja, con un máximo en otoño y un mínimo estival.
- *Zona H o sector central occidental*: Debido a la altitud y a su ubicación alejada de la costa, la temperatura media anual se sitúa en torno a 12-14 °C, con heladas invernales. El régimen de precipitaciones es similar al de la llanura litoral central (zona A), con un valor medio anual de 450 L m⁻². Las precipitaciones se distribuyen de una forma uniforme a lo largo del año y alcanzan su mínimo en el estío que también presenta cierta probabilidad de formación de tormentas.

5.4.2. El clima marino

Los mares y océanos tienen una capacidad de acumulación de calor muy superior a la de la atmósfera (casi 1200 veces), por lo que son un componente trascendental del sistema climático terrestre en términos de balance de energía. En efecto, esta propiedad permite explicar la variabilidad climática interanual, ciertos cambios en el sistema climático y los flujos de energía.

Las variabilidades del océano Atlántico en su vertiente nororiental y del mar Mediterráneo en su vertiente occidental, así como la comunicación entre ambas cuencas, son aspectos determinantes de la climatología de la península ibérica. Los estudios realizados sobre el comportamiento del mar Mediterráneo, incluyendo temperatura y salinidad a diferentes cotas de profundidad, indican que, en general, no se han producido cambios reseñables en la frecuencia y la intensidad de las perturbaciones atmosféricas que afectan a las regiones costeras durante la segunda mitad del siglo XX. Estas investigaciones mostraron un progresivo aumento de temperatura y salinidad de las aguas profundas y de la salinidad de las aguas intermedias en la segunda mitad del siglo XX. Dichos cambios no parecen haber repercutido significativamente en los flujos de calor del mar a la atmósfera, a excepción de cierta alternancia, de mayor o menor transferencia, entre los periodos 1958 y 1975, y 1975 y 2001. En el inicio del siglo XXI, desde 2004 a 2013 se ha observado una tendencia levemente positiva en temperatura y en salinidad que se ha incrementado en un factor de 4 desde el año 2013. Destaca el elevado flujo de calor hacia la atmósfera que tuvo lugar entre 2004 y 2005 que generó grandes capas de mezcla vertical en una extensa región del Mediterráneo noroccidental y la formación de un volumen inusualmente elevado de aguas densas en profundidad (FADP, por sus siglas en inglés), denominándose el fenómeno “Transitorio del Mediterráneo Occidental”. Esto provocó una disminución de temperatura y salinidad en las aguas intermedias. El FADP se ha venido repitiendo en 2006, 2009, 2010, 2012 y 2013. En relación al nivel del mar Mediterráneo no se ha observado incremento significativo entre las décadas de 1970 a 1990. Esto se ha asociado al forzamiento negativo causado por el aumento de la presión atmosférica. Posteriormente se ha observado un incremento del nivel del mar en concordancia con la tendencia positiva global. El incremento promedio del nivel del mar absoluto (geocéntrico) observado en el Mediterráneo para el periodo 1993-2015 ha sido de $2,6 \pm 0,2$ mm año⁻¹ (Salat *et al.*, 2017).

El oleaje en la costa mediterránea presenta una altura de ola media de 1-1,5 m y periodo medio de 5-6 s. La variabilidad estacional exhibe un fuerte patrón semestral caracterizado

por alturas máximas de olas en primavera y otoño. Esta variabilidad está asociada a la presencia de ciclones intensos producto del incremento de la interacción aire-mar (Jordà *et al.*, 2017).

5.5. Referencias

Azorín-Molina, C., Vicente-Serrano, S. M., Mcvicar, T. R., Jerez, S., Sánchez-Lorenzo, A., López-Moreno, J.-I., Revuelto, J., Trigo, R. M., Lopez-Bustins, J. A. y Espírito-Santo, F. (2014) “Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends over Spain and Portugal, 1961-201”, *Journal of Climate* 27, pp.3692-3712.

De Castro, M., Martín-Vide, J. y Alonso, S. (2005) The climate of Spain: past, present and scenarios for the 21st century. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/01_The%20climate%20of%20Spain_ing_tcm30-178515.pdf. [Consultado 01-05-2023] y referencias citadas.

Giralt, S., Ana Moreno, A., Isabel Cacho, I. y Blas Valero-Garcés, B. (2017) “Una breve síntesis de la evolución climática de la península Ibérica durante los últimos 2000 años”, *Clivar Exchanges*, 73, pp.5-10 y referencias citadas.

Jordà, G., Menéndez, M., Aznar, R. y Sánchez-Arcilla, A. (2017) “Proyecciones de clima regional marino sobre España”, *Clivar Exchanges*, 73, pp.53-64 y referencias citadas.

Martín-Vide, J. y Olcina, J. (2001) *Climas y tiempos de España*. Madrid: Alianza Editorial, pp. 258.

Montávez, J.P., Fernández, J., Casanueva, A., Gutiérrez, J.M. y Sánchez, E. (2017) “Proyecciones de clima regional sobre España: atmósfera. Evaluación del clima presente”, *Clivar Exchanges*, 73, pp.39-44 y referencias citadas.

Pérez Cueva, A.J. (1994) *Atlas climático de la Comunidad Valenciana: (1961-1990)*. Valencia: Conselleria de Política Territorial, Obras Públicas y Movilidad.

Rivera, A. (2014) Los climas de la Comunidad Valenciana. Disponible en: <http://eltiempo.lasprovincias.es/las-cosas-del-clima/los-climas-comunidad-valenciana>. [Consultado 7-05-2023].

Rodríguez-Fonseca, B., Casado, M.J. y Barriopedro, D. (2017) “Modos de variabilidad que afectan al suroeste de Europa”, *Clivar Exchanges*, 73, pp.24-31 y referencias citadas.

Salat, J., Lavín, A., González-Pola, C., Vélez-Belchí, P. Sánchez, R., Vargas-Yáñez, M., García-Lafuente, J., Marcos, M. y Damià Gois, D. (2017) “Variabilidad oceánica y cambios de nivel del mar alrededor de la península ibérica, Baleares y Canarias”, *Clivar Exchanges*, 73, pp.32-37 y referencias citadas.

Sánchez, E., Rodríguez-Fonseca, B., Bladé, I., Brunet, M., Aznar, R., Cacho, I., Casado, M.J., Gimeno, L., Gutiérrez, J.M., Jordà, G., Lavín, A., López, J.A., Salat, J. y Valero, B. (2017) “Progresos en la detección y proyecciones de cambio climático en España desde el informe 2010 de evaluación regional del clima pasado, presente y futuro del Comité CLIVAR-España”, *Clivar Exchanges*, 73, pp.1-4 y referencias citadas.

Vicente-Serrano, S. M., Azorín-Molina, C., Sánchez-Lorenzo, A., Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., Revuelto, J., López-Moreno, J. I. y Espejo, F. (2014a) “Temporal evolution of surface humidity in Spain: recent trends and possible physical mechanisms”, *Climate Dynamics*, 42, pp.2655-2674.

Vicente-Serrano, S. M., Azorín-Molina, C., Sánchez-Lorenzo, A., Revuelto, J., López-Moreno, J. I., González-Hidalgo, J. C., Morán-Tejeda, E. y Espejo, F. (2014b) “Reference evapotranspiration variability and trends in Spain, 1961-2011”, *Global and Planetary Change*, 121, pp. 26-40.

Vicente-Serrano, S.M., y Rodríguez Camino, E. (2017) “Tendencias recientes de las variables atmosféricas en España”, *Clivar Exchanges*, 73, pp.12-23 y referencias citadas.

5.6. Bibliografía

Asociación Española de Climatología (2014) *Cambio Climático y Cambio Global*. Serie A, 9, Madrid: Asociación Española de Climatología (AEC).

Farmer, G.T. y Cook J. (2013) *Climate Change Science: A Modern Synthesis*, Vol. 1-The Physical Climate. Springer.

Guijarro, J.A., César Azorín Molina, C., González-Hidalgo, J.C. Sánchez-Lorenzo, A., Sixto Herrera, S. y López, J.A. (2017) “Observaciones climáticas atmosféricas y reconstrucciones instrumentales sobre la península ibérica I. Obtención de series climáticas de alta calidad”, *Clivar Exchanges*, 73, pp.11-14.

Mann, M.E., Bradley, R.S. y Hughes, M.K. (1998) “Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries”, *Nature*, 392 (6678), pp.779–787.

Capítulo 6: Monitorización del deterioro

Contenidos

- 6.1. Agentes causantes del deterioro
 - 6.1.1. El clima del lugar
 - 6.1.2. Contaminantes atmosféricos
 - 6.1.3. Efectos adversos en el patrimonio
 - 6.1.4. Calidad del aire
- 6.2. La corrosión del hierro y el acero
 - 6.2.1. Corrosión atmosférica
 - 6.2.2. Corrosión microbiológica
- 6.3. Monitorización de los procesos de corrosión
 - 6.3.1. Monitorización de variables medioambientales
 - 6.3.2. Monitorización del objeto
 - 6.3.3. Campañas de exposición de probetas. Ensayos de laboratorio
 - 6.3.4. Campañas de exposición de probetas. Exposición a la atmósfera exterior
 - 6.3.5. Campañas de exposición de probetas. Exposición a la atmósfera interior
- 6.4. Monitorización de la suciedad superficial
- 6.5. Umbrales operacionales
- 6.6. Referencias
- 6.7. Bibliografía

Una de las actividades esenciales en la tarea de conservar el patrimonio cultural y, más específicamente, el patrimonio ferrocarrilario consiste en determinar las causas que provocan su deterioro y cuantificar este último. Aunque los agentes de deterioro son muy diversos, a partir de la segunda mitad del siglo XX los científicos han puesto el foco de atención en los factores climáticos y los contaminantes atmosféricos. Las líneas de investigación se han centrado en conocer los mecanismos de degradación y para ello se han realizado numerosos ensayos de laboratorio mediante exposición a agentes de deterioro en condiciones controladas y campañas de exposición de probetas realizadas

con materiales de referencia (estándares) al exterior o en recintos cerrados. De este modo, es posible estudiar cómo evoluciona el proceso de alteración y la magnitud que alcanza en el corto, medio o largo plazo. Además de predecir el alcance del efecto adverso, estos modelos teóricos permiten identificar situaciones o mapear áreas de riesgo. Abarcar el estudio de los problemas de deterioro de la gran variedad de objetos que conforman el patrimonio ferrotranviario y de la diversidad de sus materiales constituyentes, excede las capacidades del presente proyecto de investigación, limitado a tres años. Por esta razón, la investigación llevada a cabo se ha centrado en un material constituyente de gran parte de los bienes más emblemáticos del patrimonio ferrotranviario, el hierro y sus aleaciones, especialmente, el acero. En el presente capítulo se efectúa una revisión de los avances acontecidos en materia de modelización de procesos de deterioro de hierro y acero, lo cual constituirá la base para abordar, en los siguientes capítulos el diseño de modelos y proyecciones que permitan estimar los posibles efectos causados en estos materiales por el cambio climático para poder prevenirlos o mitigarlos.

6.1. Agentes causantes del deterioro

Los agentes responsables del deterioro de un objeto expuesto a la atmósfera pueden agruparse en dos categorías principales: agentes climáticos y agentes químicos o biológicos presentes en el aire. En este apartado se consideran separadamente las principales características de ambos grupos.

6.1.1. El clima del lugar

Cuando se observa el deterioro de un objeto metálico, expuesto a la atmósfera, es frecuente asociar este daño a un agente extraño presente en el aire. Sin embargo, en muchos casos, el agente causante directo o indirecto de la alteración está implícito en las condiciones atmosféricas propias del lugar. Los valores de temperatura extremos, o variaciones excesivamente grandes o bruscas pueden producir fracturas por estrés del metal. Los valores de radiación solar pueden inducir reacciones. La lluvia o la humedad elevada provocan la formación de láminas de agua que actúan como electrolito y favorecen la oxidación electroquímica del metal y el crecimiento de microorganismos. Los vientos intensos arrastran partículas que son proyectadas sobre la superficie del objeto produciendo pérdidas de material por impacto o deposición de las partículas, generando una capa de suciedad. La nieve y las heladas pueden provocar fisuras o fracturas por sobrepresiones durante la transformación del agua helada en agua líquida. Todas las situaciones referidas pueden tener un impacto más o menos severo sobre el objeto en función de su naturaleza, composición y estructura ya que estas características determinan su vulnerabilidad a los agentes climáticos.

Temperatura

En relación con la temperatura se han establecido tres causas de impacto adverso (Michalski, 1994):

- Temperaturas excesivamente bajas.
- Temperaturas excesivamente elevadas.
- Fluctuaciones de temperatura.

Los materiales más afectados a las bajas temperaturas son los plásticos y las pinturas que se vuelven frágiles. Las temperaturas excesivamente elevadas por encima de 50 °C pueden ser perjudiciales para barnices realizados con resinas o ceras. Cada 5 °C de reducción de la temperatura se duplica la vida de estos materiales. Si el objeto contiene materiales frágiles alternando en capas con otros, las fluctuaciones de temperatura pueden ser dañinas.

Humedad Relativa

Las inadecuadas condiciones de humedad relativa (HR) que causan un impacto adverso son (Michalski, 1994):

- HR por encima o debajo de ciertos valores críticos.
- HR baja (~ 0 %).
- Fluctuaciones de HR.

El exceso de humedad provoca, principalmente, el crecimiento de microorganismos y la aparición de procesos de corrosión electroquímica. HRs por encima o por debajo de ciertos valores afectan a muchos compuestos iónicos con carácter más o menos delicuescente como vidrio u objetos arqueológicos. Materiales como papel o madera requieren un cierto grado de humedad para su adecuada conservación, por lo que las condiciones de baja HR son muy nocivas. Las fluctuaciones de la HR, al igual que sucedía con la temperatura, son muy inapropiadas para objetos con diversos materiales distribuidos en capas ya que pueden llevarlos a fatiga mecánica, fracturas o craquelados. Actualmente, se recomienda no exceder valores de fluctuación de HR del orden de ± 25 %, considerándose adecuadas fluctuaciones por debajo de ± 10 % HR (Michalski, 1993).

Las instituciones públicas con competencias en materia de protección del patrimonio cultural han establecido unas condiciones climáticas de conservación preventiva que incluyen niveles recomendados de variables climáticas con unas oscilaciones máximas permitidas para cada tipo de objeto. En la tabla 6.1 se muestran las recomendaciones dadas por el Ministerio de Cultura para la conservación de objetos en museos y colecciones históricas.

Tabla 6.1. Recomendaciones para la conservación de objetos en museos y colecciones históricas (Ministerio de Cultura, 2009).

Parámetro	Niveles recomendados de variables climáticas	Oscilación Máxima permitida
Humedad Relativa	30-70 %	Oscilación máxima de ± 5 -10 % en ciclo diario Oscilación máxima de ± 20 % en ciclo estacional
Temperatura	17-27 °C	Oscilación máxima de ± 2 -5 °C en ciclo diario Oscilación máxima de ± 10 °C en ciclo estacional

Algunos autores como Stolow (1985) y La Fontaine (1981) han especificado valores de temperatura y humedad relativa para cada material. La tabla 6.2 recoge los propuestos para objetos en metal y madera policromada exhibidos en colecciones históricas y museos.

Tabla 6.2. Valores de variables climáticas recomendados para la conservación de objetos en metal y madera policromada.

Variable climática	Stolow (1985)	La Fontaine (1981)	ICOM (1971)
Temperatura	20-30 °C	20-25 °C (óptimo 21 °C)	
Humedad relativa			<30 %

6.1.2. Contaminantes atmosféricos

La ciencia de los contaminantes atmosféricos se ocupa de la medición, rastreo y predicción de las concentraciones de compuestos químicos determinantes de la calidad del aire y con influencia en ciertos fenómenos atmosféricos. Se pueden establecer tres procesos principales en los que están involucrados:

- *Emisiones:*
 - a) *Antropogénicas:* combustión de fueles y otras sustancias.
 - b) *Biogénicas:* funciones biológicas de los organismos.
 - c) *Geogénicas:* vulcanismo.
 - d) *Procesos químicos:* que crean los contaminantes, los modifican o los destruyen.
- *Transporte:* el viento y la lluvia, principalmente.
- *Deposición:* retorno desde la atmósfera a la superficie terrestre mediante procesos químicos como la fotosíntesis o transporte mecánico por gravedad o bien por la lluvia, la niebla y la nieve.

La **contaminación atmosférica** es la condición por la que ciertas sustancias, denominadas **contaminantes atmosféricos**, que están presentes en la atmósfera en una cierta concentración, pueden ocasionar efectos adversos en los sistemas naturales y humanos (Tan, 2014).

La tabla 6.3. resume los agentes contaminantes responsables de los principales efectos adversos en el ser humano y el medioambiente. Se acostumbra a clasificar en gases, aerosoles y partículas sólidas, también denominadas materia particulada (PM, por sus siglas en inglés). Algunos de estos contaminantes atmosféricos poseen una parte de compuestos gaseosos sensible a la pituitaria y dan lugar a **olores**. Los olores son producidos por agentes químicos específicos, como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el bisulfuro de carbono (CS_2) y los mercaptanos ($R-SH$ o R_1-S-R_2) (Spiegel y Maystre, 1998). Los aerosoles son pequeñas partículas sólidas o líquidas (gotículas) que, por su escaso tamaño y masa, poseen una velocidad de caída tan baja que permanecen en suspensión en una masa de aire por el empuje de Arquímedes¹ (DIN EN ISO 29464:2020). Según su origen pueden ser partículas transportadas por el viento en fase sólida (polvo), partículas en fase sólida o líquida asociadas a procesos de combustión (humo), fase sólida del humo tras haberse

¹ Se excluyen las gotas o cristales que forman la lluvia o las nubes.

transformado en polvo muy fino (cenizas volantes)² o aerosoles marinos formados por la acción del viento incidiendo en la superficie de mares y océanos. La **materia particulada** o partículas sólidas en suspensión en el aire se clasifican por su tamaño en PM_{2,5} (2,5 µm) y PM₁₀ (10 µm).

Tabla 6.3. Agentes contaminantes responsables de los principales efectos adversos en el ser humano y el medioambiente.

Gases	Partículas sólidas	Aerosoles
SO _x , H ₂ S, NO _x , Ozono, VOCs*	Hollín (carbón elemental) y partículas carbonosas (producto de combustión).	Micro-gotas de vapor de agua conteniendo iones cloruros, sulfatos, nitratos, amonio, sodio o potasio.
Otros:	Polvo procedente del suelo: partículas minerales (calcita, arcillas, óxidos metálicos, yeso, etc.).	
Dióxido de carbono (CO ₂), halógenos y sus derivados, amoníaco, ion amonio, peróxido de hidrógeno, ácido nítrico, ácido sulfúrico, sustancias radiactivas.	Partículas de metales pesados y ligeros. Fibras de ropa y alfombras. Otros: Caspa y partículas de piel, plantas, cabellos humanos, partes de insectos, fragmentos de pintura.	

VOC: Compuestos orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés).

Los contaminantes atmosféricos se suelen clasificar, atendiendo a su origen, en **contaminantes primarios**, que se emiten directamente desde la fuente y **contaminantes secundarios**, si se forman mediante reacciones químicas a partir de los primarios. Por ejemplo, las reacciones fotoquímicas entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos reactivos que dan lugar a ozono (O₃), formaldehído y nitrato de peroxiacetilo o la reacción entre formaldehído y ácido clorhídrico que produce éter diclorometílico. En general, estas transformaciones se llevan a cabo mediante cuatro tipos básicos de reacciones químicas:

- *Bimoleculares*: a partir de dos moléculas reactivas se forman dos productos.
- *Tres cuerpos*: dos reactivos se combinan para dar un nuevo producto más inestable. Una tercera molécula (inerte) interviene para estabilizar este último eliminando el exceso de energía.
- *Fotólisis*: un fotón de radiación solar rompe un enlace químico en la molécula del reactivo iniciando el proceso reactivo.

² La palabra inglesa smog proviene de combinar *smoke* (humo) y *fog* (niebla). No muy frecuentemente, se traduce por neblumo (combinación de niebla y humo). Se usa para designar la contaminación atmosférica que se produce en algunas ciudades como resultado de la combinación de unas determinadas circunstancias climatológicas y unos contaminantes concretos.

- *Descomposición térmica*: una molécula se descompone por colisión con otra molécula que permanece inerte.

La tabla 6.4 muestra los contaminantes primarios y secundarios más importantes, las principales fuentes emisoras y el tipo de contaminante que generan.

Tabla 6.4. Fuentes de emisiones primarias.

FUENTES	CONTAMINANTES
CONTAMINANTES PRIMARIOS	
Naturales	
Volcanes	SO ₂ , partículas
Incendios forestales	CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , NH ₃ , partículas
Vegetación	CO ₂
Vegetación en descomposición	CH ₄ , H ₂ S
Suelo	Materia particulada
Espuma de mar	Partículas de sal
Antropogénicos	
Procesos industriales	SO ₂ , VOCs, Partículas carbonosas, NO _x , CO ₂ , metales pesados
Procesado del estiércol	CH ₄ , CO ₂
Quema de combustibles fósiles	CO, NO _x , hidrocarburos, compuestos de plomo
Biológicos	
Metabolismo de seres vivos	CH ₄ , CO ₂
CONTAMINANTES SECUNDARIOS	
Reacciones entre contaminantes primarios	SO ₃ , HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , H ₂ O ₂ , NH ₄ ⁺ , O ₃ , PM

6.1.3. Efectos adversos en el patrimonio

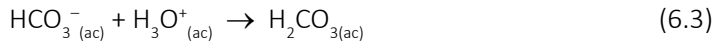
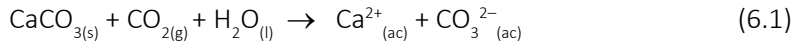
Los contaminantes atmosféricos, solos o combinados con factores climáticos, producen alteraciones químicas en los materiales integrantes de los bienes culturales. Seguidamente se describen algunos de los procesos más comunes en que participan los contaminantes con mayor impacto en el patrimonio.

Dióxido de carbono (CO₂)

Este gas está presente en la atmósfera como componente minoritario (0,03% volumen). Su concentración ha ido progresivamente aumentando a consecuencia del efecto invernadero siendo, actualmente, una de las principales causas del cambio climático. Este gas interviene en algunos procesos de degradación de materiales de cierta importancia.

La ligera capacidad de solubilización espontánea del carbonato de calcio en agua, que da

lugar a fenómenos de reprecipitación tan singulares como las estalactitas y estalagmitas, es conocida como el **efecto Karst**. Este proceso puede incrementarse, si la disolución en contacto con la calcita tiene un $\text{pH} < 7$. Este es el caso de algunos contaminantes atmosféricos como el CO_2 que, al disolverse en agua, tienen reacción ácida. En efecto, la disolución de CO_2 en las gotas de lluvia da lugar al desplazamiento de diversos equilibrios químicos del sistema de ácido-base conjugada $\text{H}_2\text{CO}_3\text{-CO}_3^{2-}$,



Dióxido de azufre (SO_2):

Se forma durante la combustión de combustibles fósiles y otros productos a partir del azufre presente en ellos y el oxígeno atmosférico. El SO_2 es responsable de la formación de aerosoles. Este gas puede atacar la roca caliza mediante un proceso, denominado **deposición ácida**, por el cual reacciona con el carbonato de calcio transformándose en sulfato de calcio dihidrato. Se han reportado dos mecanismos de deposición ácida ilustrados en las figuras 6.1 y 6.2.

La **deposición seca** tiene lugar en áreas localizadas de las zonas resguardadas del edificio y se produce en ausencia de precipitaciones. En este proceso el SO_2 se fija a la superficie del muro de calcita y, en presencia de agua, se transforma en ácido sulfúrico que disuelve el carbonato de calcio de la piedra formando sulfato de calcio dihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que es el principal componente del yeso (figura 6.1a). Debido a la mayor solubilidad del yeso, la costra formada se disuelve y acaba desprendiéndose dejando expuesta una nueva superficie de calcita lo que permite que el ciclo vuelva a repetirse (figura 6.1b).

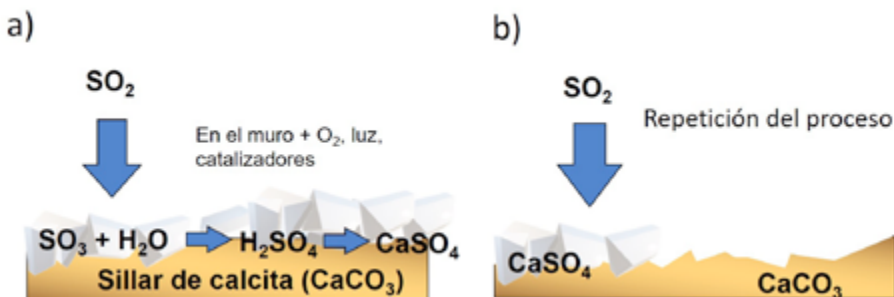


Figura 6.1. Procesos de formación de sulfato de calcio mediante deposición seca a partir del dióxido de azufre atmosférico y calcita del monumento: a) mecanismo de deposición seca; b) repetición del ciclo.

De modo similar al CO_2 , el SO_2 se disuelven en las microgotas que se forman en las nubes al llover y se transforman en ácido sulfúrico. En este caso, el pH puede bajar a 4,5 o incluso 3,5 y el proceso de alteración recibe el nombre de **lluvia ácida** (Sikiotis *et al.*, 1994).



La lluvia ácida es causante de la **deposición húmeda** que se da en las zonas expuestas donde el SO_2 , disuelto en las gotas de lluvia, se transforma en ácido sulfúrico y ataca el material pétreo (figura 6.2a). De modo similar a la deposición seca, el ciclo se repite sucesivamente (figura 6.2b) (Van Grieken *et al.*, 1994).

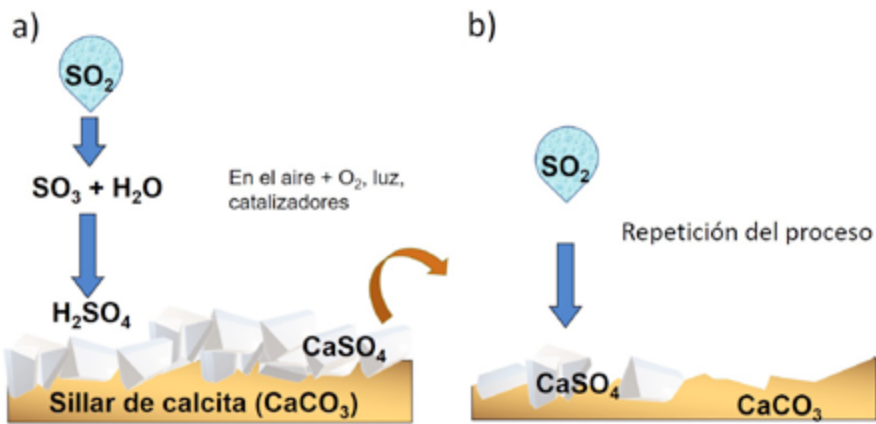
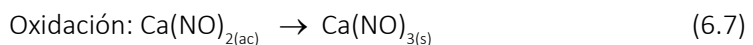
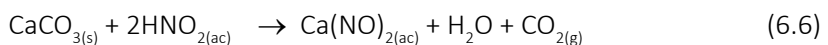


Figura 6.2. Procesos de formación de sulfato de calcio mediante deposición húmeda a partir del dióxido de azufre atmosférico y calcita del monumento: a) mecanismo de deposición húmeda; b) repetición del ciclo.

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno, principalmente NO_2 , formados a partir de los combustibles utilizados por automóviles, centrales eléctricas y usos domésticos, también son causantes de lluvia ácida al transformarse en ácido nitroso reaccionando con O_2 de día y con O_3 de noche. El ácido nitroso, por fotooxidación, pasa a ácido nítrico disuelto en las gotas de lluvia y, por ende, es responsable de la deposición húmeda. Se ha comprobado que la velocidad de deposición es muy superior a la del SO_2 (tabla 6.5.). El ácido nítrico formado da lugar a $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (Vidal *et al.*, 2019):



En ambos procesos de deposición seca y húmeda, las características del material pétreo son determinantes de la intensidad y velocidad de la degradación. La presencia de abundante porosidad abierta de pequeño diámetro (rocas areniscas) favorece la migración capilar y la penetración de la disolución ácida, lo que hace más vulnerable la roca. Ninguna roca caliza, incluso aquellas con escasa porosidad como los mármoles, está exenta de sufrir daños.

La lluvia ácida, una vez en el suelo o en el agua, es neutralizada por los agentes alcalinos naturales como el ion carbonato CO_3^{2-} . El amoníaco producido por la actividad humana, también presente en el aire en muy baja proporción, puede actuar como agente alcalino neutralizante.

Tabla 6.5. Velocidad de deposición de partículas en superficies horizontales (Nazaroff *et al.*, 1993).

Partícula	Velocidad (10^{-6} m s^{-1})
Sulfato	38-1060
Nitrato	90-750
Cloruro	320-2100

Los procesos de deposición ácida son también responsables de otra alteración conocida con el nombre de **costras negras**. En las superficies expuestas de edificios construidos, la piedra caliza se disuelve mediante los mecanismos anteriormente descritos. Sin embargo, en las zonas resguardadas de la lluvia, este proceso es más lento y da lugar a la deposición de partículas carbonosas negras y partículas de óxidos metálicos (cenosferas de combustión, partículas arcillosas del suelo, etc.) sobre las costras formadas de yeso, confiriéndoles un color pardo-negro. En la figura 6.3 se muestra una imagen en electrones secundarios de microcristales de sulfato de calcio aciculares reteniendo una cenosfera metálica producida por la combustión de fueles y también depositada sobre la superficie del monumento (fotografía de la izquierda). En la imagen derecha se aprecia el aspecto oscuro de la costra de sulfato de calcio y partículas carbonosas formada sobre un revestimiento pictórico exterior de un edificio.

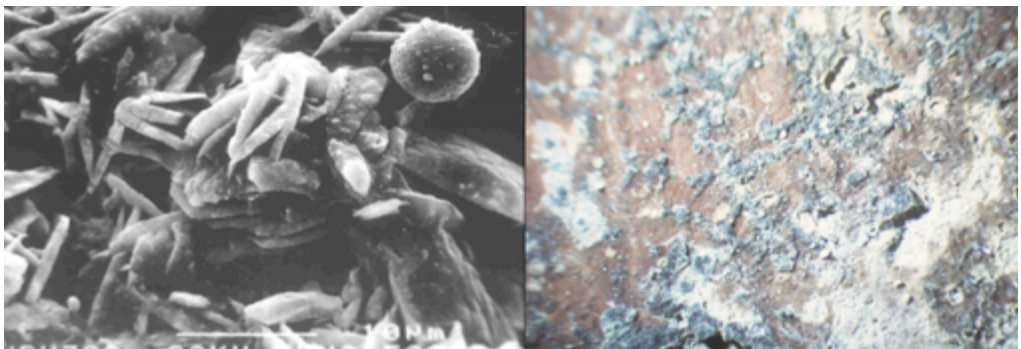
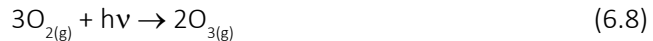


Figura 6.3. Imagen en electrones secundarios de microcristales de sulfato de calcio aciculares y cenosfera metálica (izquierda). Costra negra formada por de sulfato de calcio y partículas carbonosas sobre un revestimiento pictórico exterior de un edificio (derecha).

Ozono (O_3)

El ozono se forma mediante un proceso de fotólisis a partir de moléculas de oxígeno,



Este gas también puede formarse a nivel del suelo por la descomposición fotoquímica de NO_2 . En una segunda etapa, el O_3 formado reacciona con NO , también presente en el aire, para transformarse nuevamente en NO_2 . En los ambientes rurales en los que el contenido en NO es muy bajo, el O_3 no es descompuesto en el mencionado proceso redox, lo que da lugar a un incremento de la concentración de ozono (Vidal *et al.*, 2019). La acción combinada de NO_x y VOCs también da lugar a O_3 . Las reacciones fotoquímicas que originan este fenómeno suceden cuando la mezcla de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos volátiles emitida por los automóviles, inducida por la luz solar, inicia un complejo sistema de reacciones con el oxígeno atmosférico que acaba formando ozono. El ozono es una molécula muy reactiva que sigue reaccionando con otros contaminantes presentes en el aire y acaba formando varias decenas de sustancias distintas tales como nitratos de peroxiacilo (PAN, por sus siglas en inglés), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), radical hidroxilo (OH), formaldehído, etc.

Sinergias SO_2 - NO_2 - O_3 : estudios recientes han demostrado que el efecto corrosivo más intenso es producido por la acción combinada y sinérgica de SO_2 + O_3 seguido de la acción combinada de SO_2 + NO_2 ya que O_3 y NO_2 , por su capacidad oxidante, complementan el efecto ácido del SO_2 . Se ha demostrado que la presencia de O_3 puede incrementar los procesos corrosivos de los objetos de cobre al potenciar la oxidación de este metal a cuprita, promovida por SO_2 (Vidal *et al.*, 2019).

Monóxido de carbono (CO)

Se forma por la combustión incompleta de carbono en fueles y posee una elevada toxicidad. Este contaminante no tiene excesivo efecto adverso sobre patrimonio cultural.

Compuestos orgánicos volátiles (VOCs), hidrocarburos (C_xH_y)

Junto a otros compuestos orgánicos son emitidos por diversas fuentes tales como combustibles fósiles, actividad industrial, y emisiones naturales tales como incendios. Los VOCs se oxidan y dando lugar a compuestos no volátiles que forman aerosoles.

Metano (CH_4)

Este contaminante es producido en la minería del carbón y en la producción y uso de estiércol, así como por el metabolismo de seres vivos. Este gas produce efecto invernadero y genera ozono en la troposfera y en arrozales.

Materia particulada

Además de sus efectos nocivos (corrosivos, cancerígenos e irritantes) para el sistema respiratorio, la materia particulada es destructora de la vida vegetal, interfiere con la luz del sol, por ejemplo, formando nieblas, y es productora de daños en los objetos materiales. En relación a esto último, la materia particulada es el principal responsable de la formación de la típica capa de polvo y suciedad que progresivamente se forma en la superficie de los objetos expuestos a la atmósfera. Además, las partículas, están hechas de sustancias

muy higroscópicas, lo que incrementa la posibilidad de que se produzca algún proceso de corrosión oxidativa al proporcionar el agua que actuará de electrolito. También actúan como agentes de catálisis de los contaminantes adsorbidos, por ejemplo, en la formación de los ácidos nítrico y sulfúrico a partir de los óxidos de nitrógeno y azufre atmosféricos. El riesgo de activación de procesos de corrosión es muy elevado en las zonas costeras, donde abundan las nebulizaciones marinas ricas en cloruros.

Aerosoles marinos

Se forman por la acción del viento sobre la superficie del mar creando olas que al romper forman burbujas de aire. Estas últimas al estallar producen microgotas de agua de mar que se incorporan al aire en movimiento. La cantidad de aerosol contenido en el aire determina una variable denominada **salinidad de la atmósfera marina** o **salinidad aerotransportada**, la cual varía ampliamente de unos lugares a otros dependiendo de diferentes factores entre los que cabe destacar la distancia a la costa, la orografía de la costa, la morfología de las olas, la temperatura del agua y el viento.

De todos los factores mencionados anteriormente, el más importante y determinante es el viento y más específicamente, sus características, régimen de vientos, velocidad y persistencia. Las partículas de aerosol marino son desplazadas por la acción del viento y, al cabo de cierto tiempo y, tras haber recorrido cierta distancia tierra adentro, tienden a sedimentar o a impactar en las superficies. Por este motivo, la salinidad aerotransportada disminuye al avanzar hacia el interior del continente. Cuanto mayor es el tamaño de la partícula más rápidamente se deposita, por lo que las partículas más grandes se transportan distancias más cortas desde la línea de la costa.

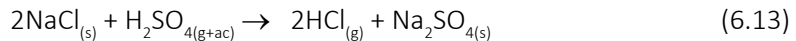
Para calcular el valor de la salinidad en aire en localizaciones situadas en la línea de costa se puede seguir el método propuesto en el Informe “PM10 y PM2,5 en ES1219: Área Metropolitana de A Coruña en 2015 y la influencia del aerosol marino. Superaciones del VLD en la estación 15030027-Torre de Hércules (A Coruña)” elaborado por la Consellería de Medio Ambiente e Ordenación do Territorio de la Xunta de Galicia (2015). Este método se basa en calcular la contribución de sal marina presente en la materia particulada existente en el aire (PM10 y PM2,5) utilizando el sodio o el cloruro como trazador. Se asume que la sal marina está compuesta exclusivamente por NaCl. Según este modelo y, considerando el contenido en NaCl en el agua de mar:

$$Sal\ marina = ([Na^+] + [Cl^-]) \times 1,168 \quad (6.9)$$

$$Sal\ marina = \frac{100}{30,6} \times [Na^+] = 3,27 \times [Na^+] \quad (6.10)$$

$$Sal\ marina = \frac{100}{55} \times [Cl^-] = 1,8 \times [Cl^-] \quad (6.11)$$

En atmósferas ricas en aerosoles marinos y otros contaminantes gaseosos como óxidos de nitrógeno o dióxido de azufre puede tener lugar una serie de reacciones por las que el cloro pasa a la fase gaseosa (Calvo Gordaliza *et al.*, 2009):



En atmósferas marinas ricas en aerosoles con elevada concentración en iones cloruro el proceso corrosivo del acero se desarrolla a través de ese mecanismo promoviendo la formación de β -FeOOH, mientras que en atmósferas pobres en aerosoles con cloruro se forma, preferentemente, α -FeOOH y γ -FeOOH (Cai *et al.*, 2020).

La acción de los agentes contaminantes atmosféricos se deja sentir, principalmente, al aire libre en entornos urbanos e industriales. Aunque en ambientes interiores los efectos de estos agentes de deterioro son menores, estos entornos no dejan de estar exentos de peligrosidad para el patrimonio cultural. En la tabla 6.6 se muestra, como ejemplo, la composición promedio del aire en el interior de un edificio Nazaroff, W.W. *et al.*, (1993). Se ha comprobado que los contaminantes atmosféricos en ambientes interiores son diferentes a los hallados en el exterior ya que, en el interior de los edificios hay fuentes emisoras específicas asociadas a los materiales utilizados en los muros y sus revestimientos de aislantes térmicos, estucos y pinturas y emanaciones de muebles, pinturas y barnices, entre otros emisores, que dan lugar a VOCs.

Tabla 6.6. Contenido típico de gases contaminantes en la atmósfera moderna interior Nazaroff, W.W. *et al.*, (1993).

Contaminante	Concentración (ppb)
Ozono	50-200
Dióxido nitrógeno	10-45
Ácido nítrico	1-10
Sulfuro de hidrógeno	0,1-0,5
Dióxido de azufre	5-24
Ácido fórmico	0,2-1
Ácido acético	0,2-1
Formaldehido	4-15
Acetaldehído	1-8
Cloruro de hidrógeno	0,5-2

6.1.4. Calidad del aire

La **vigilancia de la calidad atmosférica** o calidad del aire se efectúa para lograr dos

objetivos. Por una parte, la medición sistemática de la concentración de los contaminantes atmosféricos permite evaluar la vulnerabilidad de receptores potenciales, personas, seres vivos y obras de arte, basándose en normas, directrices y recomendaciones derivadas de los efectos observados. Por otro lado, permite analizar las causas e identificar el origen de la emisión de contaminantes atmosféricos.

Una vez que ha sido bien conocido el efecto adverso que ciertos agentes contaminantes atmosféricos tienen sobre los seres humanos y el medioambiente, desde las instituciones públicas se han realizado esfuerzos por mitigar sus efectos. Los **estándares de calidad del aire** son normas que establecen límites máximos de emisiones de sustancias consideradas peligrosas. También incluyen las metodologías necesarias para cumplir esas normas. A nivel internacional la World Health Organization (WHO) es el organismo encargado de elaborar recomendaciones para fijar los estándares de calidad de aire. Estos estándares varían de un lugar a otro, con el tiempo y el sector, y se someten a revisiones periódicas. Sin embargo, no siempre los países siguen estrictamente esas recomendaciones. Un ejemplo de ello son las US National Ambient Air Quality Standards (NAAQS), que establecen los límites tolerados de contaminantes atmosféricos que pueden afectar la salud pública y el medioambiente en los Estados Unidos de América (USA, por sus siglas en inglés). Cabe señalar que no todos los agentes contaminantes están regulados. La US Environmental Protection Agency (EPA), que es el órgano responsable de la calidad del aire en USA, fija NAAQS para seis contaminantes atmosféricos: ozono (O_3), materia particulada (PM), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NOx) y plomo (Pb) (Environmental Protection Agency, 2023). En Europa, la Unión Europea (EU) ha designado a la European Environment Agency (EEA) para establecer los estándares europeos de calidad del aire. Las directivas sobre Ambient Air Quality and National Emissions Ceilings (NEC) (2008/50/EC Directive on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe y la 2004/107/EC Directive on heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air) (European Environment Agency, 2023) son los mejores instrumentos establecido por la EU para regular la calidad del aire siguiendo las recomendaciones de la WHO. Las cantidades indicadas en dichas normas no deben excederse en los periodos de tiempo especificados. Las autoridades públicas de los países miembros están obligadas a implementar planes de gestión de la calidad del aire.

Ni en el ámbito internacional ni en el más concreto marco europeo se han establecido normas específicamente dirigidas a controlar el impacto de los contaminantes atmosféricos sobre el patrimonio cultural. Tampoco los indicadores usados por la EEA para la evaluación integrada de la contaminación ambiental y el cambio climático, que incluye el impacto de estos sobre el nivel del mar, los ecosistemas, los recursos de agua y la salud, menciona al patrimonio cultural como blanco o diana de los efectos de estos agentes adversos.

No obstante, en lo concerniente al patrimonio cultural, en las últimas décadas, diversos organismos se han preocupado por este asunto detentando el liderazgo en el control de la calidad medioambiental en museos, archivos y bibliotecas, como se resume en la Tabla 6.7:

Tabla 6.7. Organismos internacionales vinculados con la regulación de la calidad del aire para la preservación del patrimonio cultural. Ampliado y adaptado de (Muller y Thickett, 2014).

Institución	Documento o norma
Recomendaciones y directrices	
US National Institute for Science and Technology (NIST) (antes National Bureau of Standards)	NBSIR 83-2795. Air Quality Standards for Storage of Paper-Based Archival Records.
National Research Council	National Research Council (1986) <i>Preservation of Historical Records</i> . Washington, D.C.: National Academy Press.
National Information Standards Organization (NISO)	NISO (1995) TR01-1995: <i>Environmental Guidelines for the Storage of Paper Records</i> . Technical Report. Baltimore: National Information Standards Organization.
National Park Service	National Park Service (1999). <i>Museum Handbook, Part 1</i> . Washington D.C.: Museum Collections.
Canadian Conservation Institute (CCI)	Canadian Conservation Institute (2005) <i>Rare Collections Library Design Specifications</i> . Canadian Conservation Institute.
American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)	ASHRAE (2003) Museums, libraries and archives. En: ASHRAE Applications Handbook (SI Edition). American Atlanta: Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 21.1-21.16.
	Baer, N.S. y Banks, P.N. (1987) "Conservation notes", <i>International Journal of Museum Management and Curatorship</i> , 6(2), pp. 207-209.
	Thomson, G. (1986) <i>The Museum Environment</i> , 2ª ed. Londres: Butterworths.
	Muller, C. y E. Sacchi (2005) "Air Quality Monitoring at Historic Sites". <i>ASHRAE Journal</i> , 47(8), pp. 40-46.
	Tétreault, J. (2003) <i>Airborne Pollutants in Museums, Galleries, and Archives: Risk Assessment, Control Strategies and Preservation Management</i> . Ottawa: Canadian Conservation Institute.
	Purafil, Inc. (1989) <i>Environmental Control for Museums, Libraries and Archival Storage Areas. Technical Bulletin-600A</i> .
Estándares	
Government Buildings Agency (Rijksgebouwendienst)	Government Buildings Agency (1995) <i>Advisory Guide—Line Air Quality Archives, Delta Plan for Culture Preservation</i> . La Haya: Government Buildings Agency Netherlands.

International Organization for Standardization (ISO)	ISO 11844:2020. <i>Corrosion of metals and alloys-Classification of low corrosivity of indoor atmospheres</i> . Ginebra: International Organization for Standardization (ISO).
British Standards Institution (BSI)	BS EN 16893:2018. Conservation of cultural heritage-specifications for location, construction and modification of buildings or rooms intended for the storage or use of heritage collections. Londres: British Standards Institution (BSI).
National Archives and Records Administration	NARA 1571. <i>Archival Storage Standards</i> . Washington, D.C.: National Archives and Records Administration.
Comité Europeo de Estandarización	<p data-bbox="510 687 1143 860">UNE-EN 1641:2014. <i>Conservación del patrimonio cultural. Guía para la gestión de las condiciones ambientales. Centros de conservación: definiciones y características de los espacios dedicados a la conservación y gestión del patrimonio cultural</i>. Bruselas: Comité Europeo de Estandarización.</p> <p data-bbox="510 888 1143 1033">PNE-prEN 16141 <i>Conservación del patrimonio cultural. Guía para la gestión de las condiciones ambientales. Centros de conservación: definiciones y características de los espacios dedicados a la conservación y gestión del patrimonio cultural</i>.</p> <p data-bbox="510 1061 1143 1179">EN 15999-1:2016. <i>Conservación del patrimonio cultural. Pautas para el diseño de vitrinas y de exposición y conservación de bienes. Parte 1: Requisitos generales</i>. Bruselas: Comité Europeo de Estandarización.</p> <p data-bbox="510 1206 1143 1297">PNE-prEN 15999-1 <i>Conservación del patrimonio cultural. Pautas para el diseño de vitrinas de exposición y conservación de bienes. Parte 1: Requisitos generales</i>.</p> <p data-bbox="510 1324 1143 1415">PNE-prEN 15999-2 <i>Conservación del patrimonio cultural. Pautas para el diseño de vitrinas de exposición y conservación de bienes. Parte 2: Aspectos técnicos</i>.</p> <p data-bbox="510 1443 1143 1550">UNE-EN 15759-2:2018 <i>Conservación del patrimonio cultural. Climatización interior. Parte 2: Ventilación destinada a la protección de los edificios y colecciones del patrimonio cultural</i>.</p>

Commonwealth of Pennsylvania	of Commonwealth of Pennsylvania (2005) <i>Museum Air Quality Standards. Rare Collections. Library Design Specifications.</i> Harrisburg: Commonwealth of Pennsylvania.
US National Information Standards Organization	ANSI/NISO Z39.54-199X
American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)	ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022. <i>Ventilation and acceptable Indoor Air Quality.</i> ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2022. <i>Consensus residential ventilation and IAQ standard for dwelling units with nontransient occupants.</i> ASHRAE.

En la Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (Geneva Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, 1983), de la que la USA forma parte, en 1979 se estableció el término “niveles aceptables” de contaminantes atmosféricos que dañan los materiales integrantes de bienes culturales y se propuso la tasa tolerable para algunos de ellos. Más recientemente, en Europa, las normas EN 16141:2014 (European Committee for Standardization, 2014) y EN 15999-1:2016 (European Committee for Standardization, 2016) dan recomendaciones y directrices para la gestión de condiciones medioambientales en museos y colecciones y en vitrinas, respectivamente.

La US National Information Standards Organization, es una organización dedicada a la identificación, desarrollo, mantenimiento y publicación de normas técnicas para gestionar información que, en la década de 1990, publicó unos valores recomendados de concentración de los principales agentes contaminantes en el aire de museos, archivos y bibliotecas tal como muestra la tabla 6.8 (Upham, 1992).

Tabla 6.8. Valores recomendados de concentración de los principales agentes contaminantes en el aire de museos, archivos y bibliotecas (Upham, 1992).

Factor medio ambiental	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 2
	Acceso no restringido	Acceso restringido	Acceso muy restringido
PM (ppm)	75	75	75
SO ₂ (ppb)	0,35	0,35	0,35
NO _x (ppb)	2,65	2,65	2,65
O ₃ (ppb)	0,94	0,94	0,94
CO ₂ (ppm)	2,50	2,50	2,50
Rango de temperaturas (°C)	18-24 ± 1	10-13± 0.5	-29 ± 1
Rango de HR (%)	40-50	25-35	20-25

ppm: $\mu\text{g m}^{-3}$; ppb: $\mu\text{g m}^{-6}$

A nivel nacional, el Ministerio de Cultura fijó en 2009 unos valores recomendados para algunos de los contaminantes atmosféricos que se muestran en la tabla 6.9.

Tabla 6.9. Valores recomendados de concentración de contaminantes atmosféricos en museos, archivos y bibliotecas (Ministerio de Cultura, 2009).

Parámetro	Niveles recomendados de parámetros medioambientales
Materia particulada	Eficacia en su eliminación del 80%
Gases (ppm)	
SO ₂	10
NO ₂	10
O ₃	2

6.2. La corrosión del hierro y el acero

6.2.1. Corrosión atmosférica

La corrosión es el proceso por el cual los metales, por la acción de fenómenos químicos o atmosféricos, tienden a regresar a su estado original (óxido, sulfuro, carbonato) más estable, con relación al medio considerado, lo que se traduce en un deterioro de sus propiedades.

El proceso electroquímico de formación de herrumbre en objetos de hierro y sus aleaciones tiene lugar a través de los siguientes procesos de oxidación-reducción (figura 6.4):

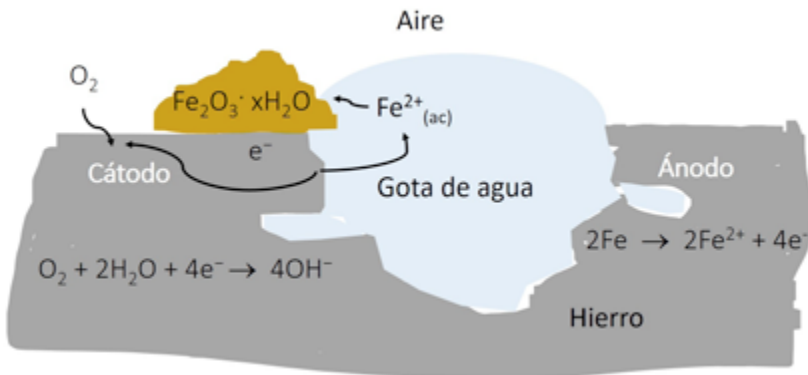
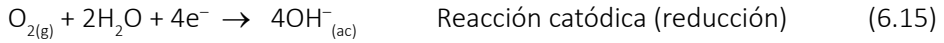
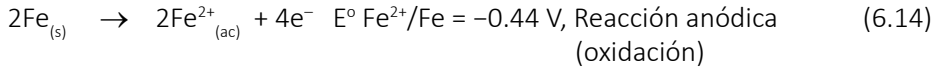
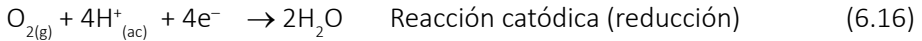


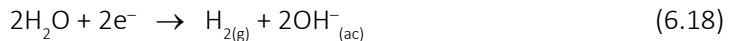
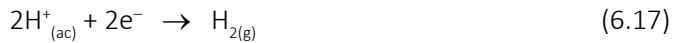
Figura 6.4. Esquema mostrando la reacción global y las semirreacciones catódica y anódica del proceso redox de formación de herrumbre.



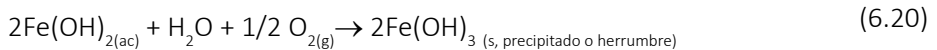
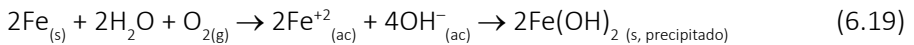
O también,



En el ánodo también tiene lugar la evolución del hidrógeno (pH<4),

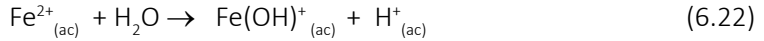
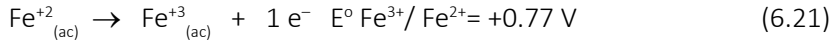


La reacción global puede escribirse:



El hidróxido ferroso, insoluble, precipita y es oxidado a hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (ec. 6.19), que es quien proporciona el color marrón rojizo característico de la herrumbre. Sin embargo, el hidróxido férrico, con el tiempo, se transforma en $\alpha\text{-FeOOH}$ por pérdida de agua.

Este proceso redox puede continuar siempre que haya humedad y oxígeno en el medio. Inicialmente, el ánodo y el cátodo están en la superficie del metal y los iones Fe^{2+} pueden reaccionar con iones OH^{-} que producirían $\text{Fe}(\text{OH})_2$ sólido en forma de capa superficial, la cual pasivaría la superficie reduciendo la velocidad de corrosión. Si la corrosión continúa, los iones Fe^{2+} se difunden lejos del ánodo y tienen lugar reacciones secundarias dependiendo de la concentración de O_2 , Fe^{2+} y H^{+} presente. Si la concentración de oxígeno es baja se forman especies inestables tales como el hidróxido de hierro (II) ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) que favorecen la precipitación de hidroxocloruro de hierro (II) ($\beta\text{-Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$). Este último compuesto puede oxidarse parcialmente dando especies inestables de Fe^{2+} y Fe^{3+} que, a su vez, incorporan iones cloruro o sulfato, si estos están presentes (Selwyn *et al.*, 1999).



Si los niveles de oxígeno son elevados y el pH es bajo, los iones Fe^{2+} permanecen en disolución ya que la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} es muy lenta a $\text{pH} < 6$. Si el $\text{pH} > 6$, el $\text{Fe}(\text{OH})_2$ se hidroliza formando $\text{Fe}(\text{OH})_3$ que, progresivamente, se transforma en $\alpha\text{-FeOOH}$ por pérdida de agua. Con el tiempo, se van formando especies más estables que, por tanto, contribuyen en mayor medida a la formación de la capa de corrosión. La especie $\alpha\text{-FeOOH}$ se forma con niveles de oxígeno elevados mientras que con niveles bajos de oxígeno se forma Fe_3O_4 ³. Tal como muestra la figura 6.5, al aumentar la pasivación del objeto por deposición de productos de corrosión, las superficies anódica y catódica se distancian y pasan a estar en niveles o capas diferentes. El cátodo se sitúa en la capa más externa de corrosión, con buen aporte de oxígeno, y el ánodo sigue situado más internamente en la superficie del metal aun inalterado. Con el aislamiento del ánodo, la acidez y la concentración de iones cloruro se incrementan y los poros y fisuras adyacentes se colmatan con disolución de cloruro de hierro (II), tal como se ilustra en la figura 6.5, en la que se describen las semirreacciones que tienen lugar en el cátodo y en el ánodo (Turgoose, 1985).

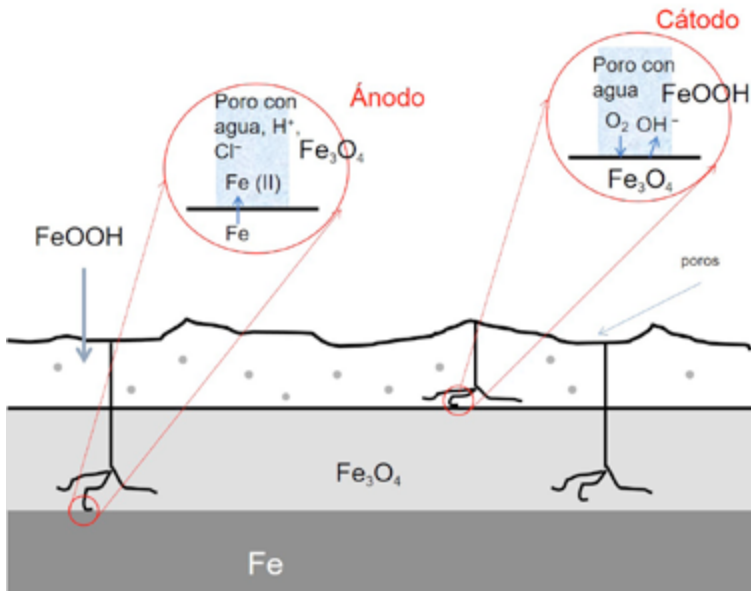
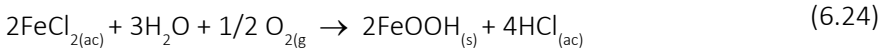
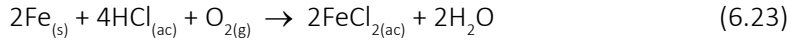


Figura 6.5. Formación de una capa interna de Fe_3O_4 donde se sitúa el ánodo y, superpuesta a ella, una capa de oxihidróxido de hierro (II), donde se sitúa el cátodo.

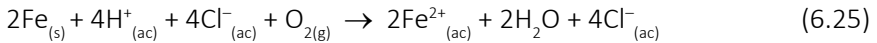
En atmósferas marinas, ricas en nebulizaciones de iones cloruro (Cl^-), estos últimos se acumulan en las capas de corrosión del objeto para compensar las cargas de los iones Fe^{2+}

³ Mineralógicamente, coincide con la magnetita, hallada en yacimientos naturales.

y de los iones H^+ que se están formando. La disolución ácida de cloruro de Fe^{2+} expuesta al aire acelera el proceso de corrosión del objeto (Askey *et al.*, 1993):



Un mecanismo alternativo en el que el ion cloruro desempeña un papel indirecto en el proceso cíclico de oxidación, sin intervenir en ella (Turgoose, 1985),



Independientemente del papel directo o indirecto de los iones cloruro, estos producen una sal soluble de hierro que permite que el proceso cíclico prosiga. A partir de esta disolución pueden precipitar varias formas alotrópicas del oxihidróxido de hierro (II) (tabla 6.10). De todas ellas α -FeOOH es la especie más estable termodinámicamente. La variedad β -FeOOH⁴, menos estable, se forma inicialmente (figura 6.6b) y con el tiempo se transforma en α -FeOOH (figura 6.6a). Mas raramente se identifica γ -FeOOH. Las lágrimas (figura 6.6a) son estructuras esféricas de paredes muy finas que se forman a partir de gotas de disolución rica en iones Fe^{2+} y Cl^- . Los iones Fe^{2+} se oxidan a iones Fe^{3+} que se hidrolizan y pueden precipitar como FeOOH. La acidez de la disolución hace aumentar la tensión superficial de la gota y mantiene su característica forma esférica. La formación de la fina corteza o "piel" tiene lugar al precipitar los oxihidróxidos de hierro (II) en la superficie de la gota en contacto con el aire, donde la concentración de oxígeno es mayor.

Tabla 6.10. Productos de corrosión atmosférica de hierro y acero.

Producto de corrosión	Especie mineral	Sistema cristalino
α -FeOOH	Goetita	Ortorrómico
β -FeOOH	Lepidocrocita	Ortorrómico
γ -FeOOH	Akaganeita	Monoclínico
α -Fe ₂ O ₃	Hematita	Hexagonal
δ -FeOOH	Ferroxita	Hexagonal
γ -Fe ₂ O ₃	Maghemita	Cúbico

La forma y tamaño de los cristales de oxihidróxidos de hierro (II) depende de las condiciones específicas en que se produce su crecimiento. La figura 6.6b muestra el aspecto de cristales de β -FeOOH formados en probetas de acero tras seis meses de exposición a la atmósfera de la ciudad de Valencia. En la figura 6.6a se muestra otra zona de la probeta donde el β -FeOOH formado inicialmente se ha transformado en α -FeOOH

⁴ Cristalográficamente coincide con el mineral lepidocrocita, hallado en yacimientos naturales.

con su típica microestructura globular. En el centro de esta imagen se observan dos lágrimas de diferente tamaño.

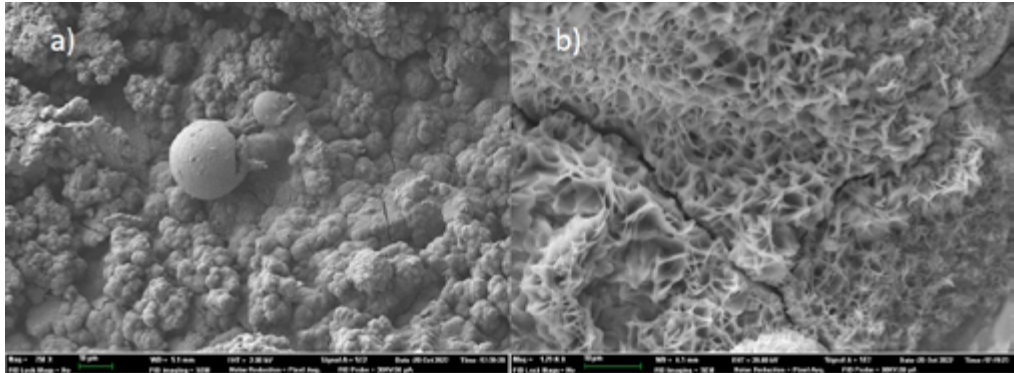


Figura 6.6. Imágenes de electrones secundarios obtenidas con un microscopio electrónico de barrido por emisión de campo en la superficie de probetas de acero tras seis meses de exposición a la atmósfera de la ciudad de Valencia: a) β -FeOOH criptocristalino globular y dos lágrimas esféricas de diferente tamaño; b) β -FeOOH.

6.2.2. Corrosión microbiológica

Muchos de los procesos de alteración asociados a contaminantes atmosféricos promueven el crecimiento de microorganismos (líquenes, algas, cianobacterias y hongos). Las colonias de microorganismos forman complejas matrices que se unen al sustrato mediante sustancias poliméricas extracelulares. Estos procesos suelen afectar principalmente a materiales cerámicos y pétreos pero los metales no están exentos de este tipo de alteración (figura 6.7).

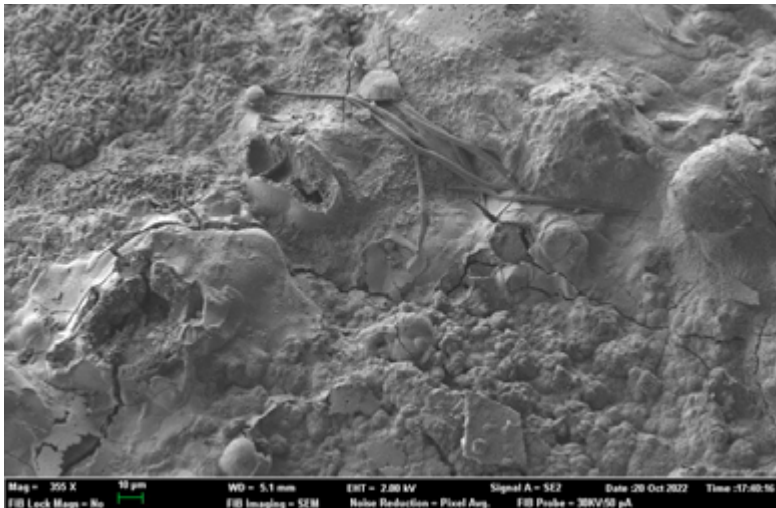


Figura 6.7. Imágenes de electrones secundarios obtenidas con un microscopio electrónico de barrido por emisión de campo en la superficie de probetas de acero tras seis meses de exposición a la atmósfera de la ciudad de Valencia. En el centro de la imagen se observa lo que parecen ser hifas de hongos.

Las patologías más habituales son:

- Liberación de productos metabólicos (O₂, S, ácidos orgánicos): picaduras.
- Aireación diferencial.
- Depolarización catódica (sulfobacterias reductoras que utilizan el hidrógeno molecular).
- Degradación de capas de protección.
- Degradación de inhibidores de corrosión.

La mayor parte de microorganismos tienen un papel indirecto en los procesos de corrosión de hierro y acero consistente en la modificación del pH, ya que su actividad tiene lugar a valores de pH muy favorables a la corrosión (pH entre 5.5 y 9)⁵. Muchas colonias bacterianas son sistemas fuertemente reductores ya que su actividad metabólica derivada de su nutrición y desarrollo. Estos procesos consisten, principalmente, en la oxidación de los nutrientes. Las bacterias aerobias generan un medio moderadamente reductor y las anaerobias aprovechan estas nuevas condiciones para proliferar. Las condiciones de crecimiento de colonias más habituales suelen fijarse a potenciales cercanos o inferiores a 0 y pH comprendido entre 6 y 9. La disminución del potencial electroquímico promueve las condiciones electroquímicas idóneas para la corrosión (figura 6.8) (Ray *et al.*, 2010; Ueki y Lovley, 2022).

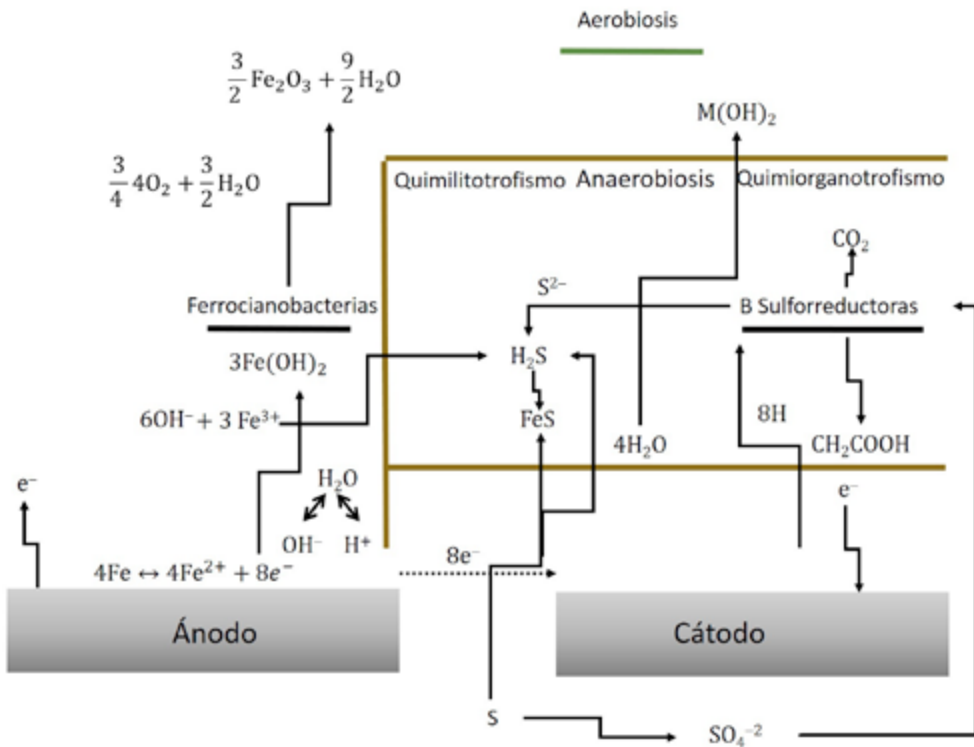


Figura 6.8. Esquema mostrando los mecanismos de los procesos de corrosión de las bacterias aerobias y anaerobias con efecto sobre objetos de hierro.

⁵ Ciertas especies como el Thiobacillus, se desarrollan a pH muy bajos, de entre 1.8 y 2.

La figura 6.9. ilustra el mecanismo de la corrosión del hierro generada por la bacteria *desulfovibrio* que da lugar al sulfuro ferroso (FeS) como producto de corrosión según la reacción (Ueki y Lovley, 2022):

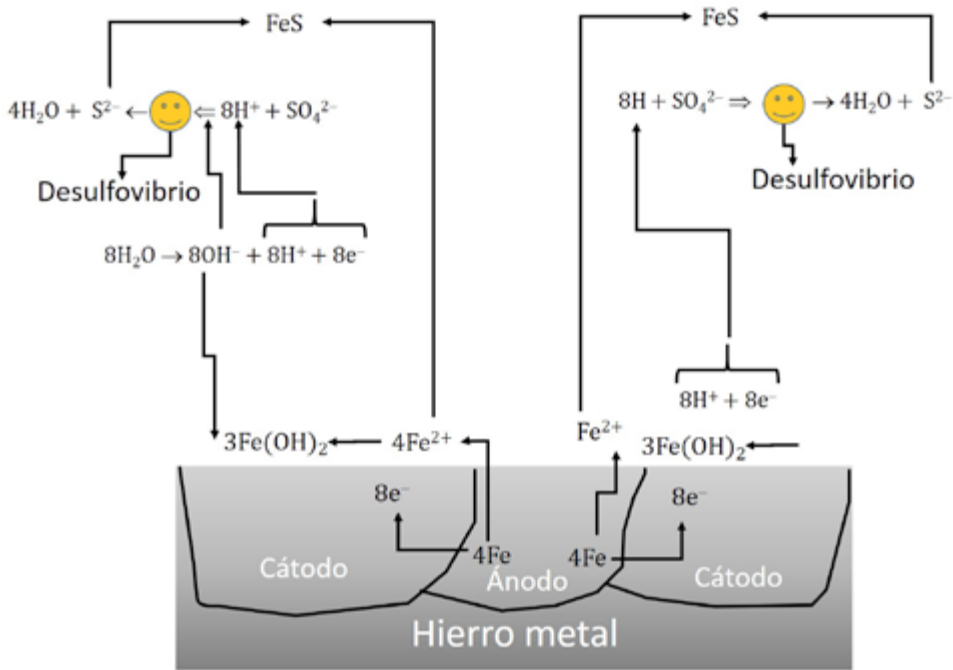
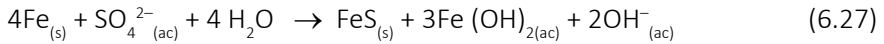


Figura 6.9. Esquema ilustrando el mecanismo de la corrosión generada por la bacteria *desulfovibrio* en objetos de hierro.

6.3. Monitorización de los procesos de corrosión

La elaboración de proyectos de monitorización es una parte esencial dentro de un programa de conservación preventiva (figura 6.10). Este tipo de proyectos incluye dos tipos básicos de actividades:

- Identificación y seguimiento de procesos de alteración en el propio objeto.
- Seguimiento de los niveles de las variables meteorológicas y contaminantes atmosféricos con impacto adverso en los bienes culturales.

Estas actividades están dirigidas a identificar los principales agentes medioambientales que constituyen un riesgo potencial o real de alteración del objeto y valorar la sensibilidad del objeto a todos ellos actuando sinérgicamente, midiendo su concentración o nivel de actividad y la intensidad del daño causado sobre el objeto. A partir de estos valores se puede realizar una primera clasificación de la corrosividad del medioambiente.

Estas dos actividades primarias se pueden completar con una tercera actividad:

- Campaña de exposición de probetas.

Este tipo de ensayos permite caracterizar la corrosividad del medioambiente de manera alternativa a la medición de los niveles de los agentes causales y, además, proporciona un modelo teórico de la cinética de corrosión que permitirá tener capacidad predictiva y preventiva sobre el objeto.

El seguimiento de los procesos de alteración y la determinación de los niveles de concentración de contaminantes y de las otras variables medioambientales puede llevarse a cabo siguiendo procedimientos que están sujetos a normas o estándares. La elección de un método estandarizado permite efectuar comparaciones con anteriores situaciones o con otros casos de estudio.



Figura 6.10. Esquema mostrando la estructura básica de un programa de monitorización.

6.3.1. Monitorización de variables medioambientales

El seguimiento de variables meteorológicas y de concentraciones de contaminantes atmosféricos puede llevarse a cabo de múltiples formas, dependiendo de los requerimientos de cada caso de estudio y de la disponibilidad de equipamiento e infraestructuras. El método más asequible, pero no por ello menos fiable, es la consulta de bases de datos en abierto, por ejemplo, la base de datos meteorológica de la Agencia Española de Meteorología (AEMET) (Agencia Estatal de Meteorología, 2023) o la base de datos de concentraciones de contaminantes atmosféricos que proporciona la Red Valenciana de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica (RVVCCA) (Generalitat Valenciana, 2023). En estas bases de datos se pueden obtener valores promedio diarios de todos los parámetros meteorológicos y contaminantes atmosféricos de interés en patrimonio, ya descritos en capítulos y apartados previos. Más específicamente, para el estudio de los efectos del cambio climático está disponible la base de datos de la Red de Seguimiento del Cambio Global en Parques Nacionales (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023). Los datos proporcionados por esta base de datos son de sumo interés (tabla 6.11). Por una parte, los parques nacionales son ambientes muy representativos de los sistemas naturales en los que se integran, por ser reservorios de biodiversidad sujetos a estrictas políticas de conservación. Además, son sistemas muy bien caracterizados pues en ellos se lleva a cabo un control exhaustivo del impacto antrópico y numerosas investigaciones que aportan abundantes datos. La red comprende once parques naturales distribuidos por toda la geografía del país. Desafortunadamente, ninguno de ellos se halla situado en la Comunitat Valenciana, ni en sus proximidades. Dependiendo del parámetro monitorizado, los datos son proporcionados con una periodicidad diezminutal, diaria o mensual.

Tabla 6.11. Datos proporcionados por la base de datos de la Red de Seguimiento del Cambio Global en Parques Nacionales.

Parámetro	Tipo
Temperatura	Temperatura del aire Temperatura de rocío Temperatura junto al suelo Temperatura de combustible
Humedad	Humedad del aire Humedad de combustible
Viento	Velocidad del viento Velocidad máxima del viento Dirección del viento Dirección de la velocidad máxima del viento
Precipitación	Pluviometría Precipitación horizontal
Contenido de agua del suelo	
Altura de nieve	

Presión

Radiación solar

Radicación global

Radiación neta

Radiación difusa

Radiación global reflejada

Radiación global inclinada

Radiación solar directa

Radiación UVA

Radiación UVB

Radiación Infrarroja global

Radiación Infrarroja reflejada

Radiación Infrarroja larga global

Radiación PAR global

Radicación PAR reflejada

Albedo

Oscuridad del cielo nocturno

Deposiciones atmosféricas

ETo

Evapotranspiración

Conductividad eléctrica

Conductividad del terreno

Si se dispone de equipamiento e infraestructura, la monitorización puede llevarse a cabo en el mismo lugar donde se halla el bien cultural. Las normas UNE-EN ISO 8565:2012 y UNE-EN ISO 11844:2020 (partes 1,2 y 3) establece los principios para la selección del método de medición de contaminantes atmosféricos en las atmósferas exteriores y de interior, respectivamente. El procedimiento a seguir dependerá del grado de precisión que se desee alcanzar en los resultados. La instrumentación analítica actualmente disponible es muy variada. Ciertos equipos adquieren datos meteorológicos o de contenido en contaminantes atmosféricos en continuo (a intervalos de 10 s) mediante sensores específicos. En otros instrumentos se puede programar el tiempo de adquisición de datos, proporcionando valores promedio. Los aparatos más simples son sensores pasivos que recogen el contaminante durante un tiempo prefijado (un día, una semana, un mes).

La principal ventaja de toda esta instrumentación es que proporcionan datos reales del microclima y medioambiente específico en el que se halla el bien cultural. El inconveniente es que los datos comenzarán a obtenerse en el momento en el que se implemente el procedimiento, no disponiendo de datos históricos que pueden proporcionar información muy importante para elaborar los modelos teóricos que describan los procesos de alteración.

La tabla 6.12 resume los criterios básicos para diseñar un programa de monitorización.

Tabla 6.12. Criterios básicos para establecer el programa de monitorización del medioambiente.

Criterio	Descripción
Objetivo de la medición	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar la agresividad del medioambiente sobre el bien cultural. • Identificar las fuentes o causas de los procesos de alteración.
Parámetros que se incluyen en el programa	<ul style="list-style-type: none"> • Parámetros meteorológicos. • Contenido en contaminantes atmosféricos.
Normas de evaluación	Niveles de tolerancia recomendados por el Ministerio de Cultura.
Elección áreas y/o puntos de medición y densidad de puntos de medición	Localización (x,y) del área (por ejemplo, viento) o de los puntos de medición según proceda (por ejemplo, temperatura).
Posición en altura u orientación del instrumento de medida	<ul style="list-style-type: none"> • Posición en altura (z) del instrumento. • Separación entre sensores si se mide a varias alturas simultáneamente.
Duración de la medición	<ul style="list-style-type: none"> • En la monitorización automatizada en continuo: selección de la duración de la medición o paso de medición. • En la monitorización manual: frecuencia de medición y duración de la misma.
Momento de la medición	Aleatorio si no se lleva a cabo monitorización en continuo, que se combina con medición a tiempos prefijados, si se sospecha que hay eventos en los que los niveles de contaminantes pueden incrementarse por encima de los umbrales de tolerancia aceptados (por ejemplo, episodios de viento procedente del Sahara, en la festividad de Fallas se prevé un incremento del SO ₂).
Procedimiento de medición	Elección del método o instrumento de medición.
Requisitos de calidad	Los métodos de medición deberían seguir normativa de ensayos normalizados.
Registro de los datos	Gráficos, tablas numéricas, geolocalización.
Costes	Recursos humanos y costes de mediciones.

En la tabla 6.13 se muestran los métodos recomendados y habitualmente utilizados en la medición de contaminantes atmosféricos gaseosos y partículas en suspensión (Spiegel, y Maystre, 1998).

Tabla 6.13. Métodos recomendados y habitualmente utilizados en la medición de contaminantes atmosféricos gaseosos y partículas en suspensión (Spiegel, y Maystre, 1998).

Parámetro	Automático	Manual
Genérico	Air quality-Assessment of air quality monitoring equipment - Part 3: Performance criteria and test procedures for stationary automated measuring systems for continuous monitoring of emissions from stationary sources DIN EN 15267-3:2022-08.	
SO ₂	Conductometría	Método TFM.
	Fluorescencia UV DIN EN 14212:2022-1.	Método de gel de sílice.
SO ₄ ²⁻		Método de los platos de sulfatación (UNE-EN ISO 9225:2012; ASTM G91-11; ASTM G140-02).
		Método de Liesegang o filtracita de captación por Na ₂ CO ₃ .
NO/NO ₂	Quimioluminiscencia UNE-EN 14211:2013.	Método de Saltzman para NO ₂ .
N ₂ O	Stationary source emissions-Determination of the mass concentration of dinitrogen monoxide (N<(Index)2>O)-Reference method: Non-dispersive infrared method. DIN EN ISO 21258:2010-11.	
CO	Absorción IR DIN EN 14626:2022-11.	
O ₃	Absorción UV DIN EN 14625:2022-11.	Método del yoduro potásico.
	Quimioluminiscencia.	
Cl ⁻		Método de rodianuro de mercurio.
		Método de la candela húmeda (UNE-EN ISO 9225:2012; ASTM G91-11; ASTM G140-02).
		Método de Hache.

NH ₃		Método del indofenol. Método de Nessler.
SH ₂		Método del azul de molibdeno. Método del azul de metileno.
Partículas en suspensión	Indoor air-Part 34: Strategies for the measurement of airborne particles DIN ISO 16000-34:2019-01. Aire ambiente. Sistemas automáticos de medida para la medición de la concentración de materia particulada (PM10; PM2,5) UNE-EN 16450:2017. Dispositivo gravimétrico (ejemplo, TEOM 1400) UNE-EN 12341:2015. Dispositivo de condensación de partículas ISO/FDIS 16000-42.	Dispositivo de filtro reducido para muestreo no fraccionado. Dispositivo LIB de muestreo no fraccionado. Impactador de cascada para muestreo fraccionado.
Aerosoles	Dispositivo de condensación de partículas.	ISO 27891:2015.

6.3.2. Monitorización del objeto

Los criterios básicos para establecer el programa de monitorización del objeto se resumen en la tabla 6.14 de forma sucinta.

Tabla 6.14. Criterios básicos para elaborar el programa de monitorización del objeto.

Criterio	Descripción
Objetivo de la medición	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar la agresividad del medioambiente sobre el bien cultural. • Identificar los efectos de los procesos de alteración.
Parámetros que se incluyen en el programa	<ul style="list-style-type: none"> • Parámetros asociados a cambios en propiedades morfológicas y aspecto visual (por ejemplo, coordenadas cromáticas).
Normas de evaluación	Niveles de tolerancia recomendados por el Ministerio de Cultura.
Elección áreas y/o puntos de medición o muestreo y densidad de puntos de medición o muestreo	Aleatorio, preferiblemente, e intencionada, si se sospecha que hay efectos específicos localizados en puntos o zonas diferenciadas del objeto.

Tamaño y número de muestras	Debe alcanzarse un compromiso que asegure una mínima fiabilidad de los resultados y un máximo respeto al objeto minimizando los posibles daños causados por el muestreo.
Duración de la medición	<ul style="list-style-type: none"> • En la monitorización automatizada en continuo: selección de la duración de la medición o paso de medición. • En la monitorización manual: frecuencia de medición y duración de la misma.
Momento de la medición	Aleatorio, si no se lleva a cabo monitorización en continuo, combinada con intencionada, si se sospecha que hay eventos en los que los niveles de contaminantes pueden incrementarse por encima de los umbrales de tolerancia aceptados (por ejemplo, en la festividad de Fallas se prevé un incremento del SO ₂ , o episodios de viento procedente del Sahara).
Procedimiento de medición	<ul style="list-style-type: none"> • Elección del método o instrumento de medición. • Elección del método de muestreo.
Requisitos de calidad	Los métodos de medición deberían seguir normativa de ensayos normalizados.
Registro de los datos	Gráficos, tablas numéricas, geolocalización.
Costes	Recursos humanos y costes de mediciones.

De modo similar a lo ya descrito para la monitorización de parámetros medioambientales, el procedimiento a seguir en la monitorización de los cambios experimentados en las propiedades del objeto, que indiquen la aparición o avance de un proceso de alteración, dependerá del grado de precisión que se desee alcanzar en los resultados. El abanico de técnicas instrumentales que puede utilizarse en el laboratorio es muy amplio, al no estar limitado por la portabilidad (Doménech Carbó, 2018). Asimismo, la información proporcionada es muy diversa. Las tablas 6.15 y 6.16 resumen el conjunto de técnicas no invasivas e invasivas de aplicación en el ámbito del examen y análisis de patrimonio cultural.

Tabla 6.15. *Técnicas instrumentales de imágenes.*

Técnica	Tipo	Región
Georadar	Imagen por barrido punto por punto	Micro y radioondas
Sistema de posicionamiento global		
Fotografía IR	Imagen de campo completo	Infrarrojo (IR)- terahercios
Reflectografía IR		
Termografía		
Reflectografía IR de barrido	Imagen por barrido punto por punto	
Imágenes con radiación en terahercios		
Tomografía de coherencia óptica		

Fotografía Fotogrametría Técnicas interferométricas	Imagen de campo completo	Ultravioleta-Visible (UV-Vis)
Imagen multiespectral e hiperespectral ⁶ Escáner láser 3D LIDAR	Imagen por barrido punto por punto	
Radiografía Gammagrafía Radiografías con partículas de alta energía Tomografía computerizada	Imagen de campo completo Imagen por barrido punto por punto	Rayos X-rayos
Técnicas sónicas y ultrasónicas	Imagen por barrido punto por punto	Ondas acústicas

Tabla 6.16. *Técnicas instrumentales.*

Tipo	Propiedad
Microscopía	
Microscopía óptica	Luz visible reflejada o transmitida
Microscopía electrónica	Haz de electrones interaccionando con la materia
Microscopía de fuerza atómica	Sonda de barrido interaccionando con la materia
Técnicas de análisis de superficie	
Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X, espectrometría de masas de iones secundarios	Interacción con los átomos y moléculas de la superficie del material
Métodos electroanalíticos o electroquímicos	
Potenciometría, espectroscopía de impedancia electroquímica, amperometría, voltamperometría, coulombimetría, conductimetría	Se estudian los procesos de transferencia electrónica
Métodos ópticos	
Espectrometría de rayos X: fluorescencia de rayos X, microanálisis de rayos X por sonda electrónica, emisión de rayos X inducida por partículas, absorción de rayos X	Se analizan los rayos X emitidos o absorbidos por el material que previamente es irradiado con rayos X o partículas de alta energía
Espectrometría atómica: espectrometría de absorción atómica, espectrometría de emisión atómica, espectrometría de fluorescencia atómica	Se estudia la interacción de la radiación electromagnética con la materia en estado libre
Espectroscopía molecular: espectrofotometría ultravioleta-visible, espectroscopía infrarroja, espectroscopía Raman	Se interpreta la interacción de la radiación electromagnética con la materia en fases condensadas

⁶ Abarca también la región IR

Resonancia magnética: resonancia magnética nuclear, resonancia de spin electrónico	Se estudian los efectos de los campos magnéticos sobre los átomos del material
Colorimetría	Se efectúa una cuantificación de la percepción del color
Difracción de rayos X: difracción de rayos X, microdifracción de rayos X	Se interpretan los rayos X difractados por la materia previamente irradiada
Técnicas termoanalíticas	
Termogravimetría, análisis térmico diferencial, calorimetría diferencial de barrido	Se estudian las variaciones de las propiedades de los materiales con la temperatura
Técnicas basadas en la determinación de la relación masa/carga	
Espectrometría de masas	Se determina la relación masa/carga de iones generados a partir del material y se interpreta
Técnicas separativas	
Cromatográficas: cromatografía en capa fina, cromatografía líquida, cromatografía de gases, cromatografía de exclusión, cromatografía iónica	Mediante el equilibrio entre una fase móvil fluida y una fase estacionaria se consigue separar los componentes de una mezcla compleja
Electroseparación: electroforesis capilar	Se basa en el comportamiento diferencial de especies iónicas en un campo eléctrico
Técnicas basadas en efectos sobre el núcleo atómico	
Activación neutrónica	Efecto que se produce en el núcleo de los átomos cuando estos son irradiados con radiación γ o partículas
Espectroscopía Mössbauer	

6.3.3. Campañas de exposición de probetas. Ensayos de laboratorio

Para monitorizar los efectos inducidos en los objetos metálicos por los agentes de deterioro se realizan campañas de exposición de probetas elaboradas con materiales de referencia. Las campañas de exposición de probetas permiten diseñar modelos teóricos de corrosión que, con carácter predictivo, dan a conocer la velocidad a la cual el proceso de alteración progresa con el tiempo, lo cual permite anticiparse a los daños causados por la potencial amenaza. Una **campaña de exposición de probetas** es un experimento en el que el científico se sirve de unos especímenes, con una forma y dimensiones conocidas y predeterminadas, que se elaboran con materiales de referencia de composición conocida. Los especímenes son expuestos a unas determinadas condiciones medioambientales, durante un tiempo prefijado, para identificar los procesos de alteración que experimentan y determinar los mecanismos que controlan el avance de dichos procesos, asociándolos a sus causas. Estos experimentos pueden llevarse a cabo en el mismo ambiente en el que está expuesto el objeto o en el laboratorio. En este último caso, los resultados se extrapolan a las condiciones que se obtendrían en un ensayo de campo. La ventaja principal de los ensayos de laboratorio es que se pueden realizar en tiempos mucho menores a los ensayos de campo de exposición atmosférica de probetas. Otra ventaja de los ensayos en laboratorio es que se pueden controlar las condiciones del ensayo y establecer relaciones causa-efecto directas entre el material alterado y el agente o agentes causantes del deterioro que se están investigando. El principal inconveniente es que, al ser condiciones

controladas, los resultados tienen una menor fiabilidad por alejarse de las condiciones reales. Pese a ello, estos ensayos tienen gran importancia y muchos de ellos se encuentran sujetos a normas internacionales, existiendo laboratorios especializados en su realización.

Los ensayos de laboratorio se clasifican en dos tipos principales (Cai *et al.*, 2020):

- *Ensayos de laboratorio basados en la combinación de efectos medioambientales*: consisten en planificar el ensayo simulando el complejo efecto corrosivo ejercido globalmente por el medioambiente mediante ensayos de envejecimiento acelerado que simulan procesos corrosivos-tipo básicos. Por ejemplo, el ensayo de aerosol salino simula el efecto de deposición salina, el ensayo de calor húmedo simula el efecto de la temperatura y humedad, el ciclo de sequedad-humedad simula el proceso de formación y desaparición de la película de agua superficial por condensación y evaporación, el ensayo de Kesternich simula el efecto de los gases contaminantes. Estos ensayos pueden combinarse de distinto modo para simular las condiciones reales de un determinado contexto medioambiental.
- *Ensayos de laboratorio basados en el diseño de factores medioambientales*: se fundamentan en establecer modelos cuantitativos para el ensayo acelerado que relacionen varios factores causales y los parámetros de corrosión. Por ejemplo, los efectos de la temperatura y la humedad se determinan exponiendo el espécimen a diferentes parejas de valores de temperatura y humedad relativa en una cámara de envejecimiento.

Algunos ejemplos de este tipo de ensayos, de aplicación en metales (hierro y acero, entre ellos), se listan en la tabla 6.17 (UNE Asociación Española de Normalización, n.d.).

Tabla 6.17. Ensayos de laboratorio para el estudio de la estabilidad de metales (UNE Asociación Española de Normalización, n.d.).

Denominación del ensayo	Norma
Consideraciones sobre los problemas planteados por los ensayos acelerados en atmósfera corrosiva.	UNE 21335:1976
Ensayos de corrosión en atmósfera artificial. Prescripciones generales.	UNE-EN ISO 7384:1996
Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Determinación de la velocidad de corrosión de las probetas de referencia para la evaluación de la corrosividad.	UNE-EN ISO 9226:2012
Corrosión de metales y aleaciones. Clasificación de la baja corrosividad de las atmósferas de interior.	UNE-EN ISO 11844-1:2020
	UNE-EN ISO 11844-2:2020
	UNE-EN ISO 11844-3:2020

Corrosión de metales y aleaciones. Vocabulario.	UNE-EN ISO 8044:2020
Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Valores de referencia para las categorías de corrosividad.	UNE-EN ISO 9224:2012
Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Medida de los parámetros ambientales que afectan a la corrosividad de las atmósferas.	UNE-EN ISO 9225:2012
Corrosión de los metales y aleaciones. Eliminación de los productos de corrosión sobre las probetas de ensayo de corrosión. (ISO 8407:2021).	UNE-EN ISO 8407:2021
Ensayo de Kesternich (Testing of materials, structural components and equipment - Method of test in damp heat alternating atmosphere containing sulphur dioxide (cabinet according to Kesternich).	DIN 50018:1963-12
Corrosión de metales y aleaciones. Ensayo de dióxido de azufre en atmósfera húmeda (método de gas fijo).	UNE-EN ISO 22479:2023
Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales. Ensayos de niebla salina.	UNE-EN ISO 9227:2017
Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión cíclica acelerada con exposición a agua de mar sintética por proceso de deposición de sal. Condiciones "secas" y "húmedas" a humedad absoluta constante.	UNE-EN ISO 16539:2023
Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos cíclicos acelerados con exposición a niebla salina ácida, a condiciones/ambientes secos y condiciones/ambientes húmedos.	UNE-EN ISO 16151:2019
Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales. Ensayos de corrosión acelerada que implican la exposición alterna a gases promotores de la corrosión, niebla salina neutra y secado.	UNE-EN ISO 21207:2022
Corrosión de los metales y aleaciones. Ensayos de corrosión en atmósfera artificial. Ensayo de corrosión acelerado en exterior por pulverización intermitente de una solución salina (Scab test).	UNE-EN ISO 11474:2014
Corrosión de metales y aleaciones. Ensayo de inmersión alternada en solución salina.	UNE-EN ISO 11130:2018
Resistencia de los materiales metálicos a biogénicos líquidos y combustibles alternativos y sus mezclas (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en octubre de 2017.	UNE-CEN/TR 17144:2017

Corrosión biológica. Método de ensayo para la determinación del potencial de picadura de los aceros inoxidable, en cultivo de bacterias reductoras de sulfatos, mediante la técnica potenciodinámica de polarización anódica.	UNE 112015:1994
Corrosión de metales y aleaciones. Ensayo de corrosión bajo fatiga.	UNE-EN ISO 11782-1:2009 UNE-EN ISO 11782-2:2009
Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos de corrosión bajo tensión. Parte 1: Guía general de métodos de ensayo.	UNE-EN ISO 7539-1:2013
Conservation of Cultural Heritage-Guidelines and procedures for choosing appropriate lighting for indoor exhibitions.	DIN EN 16163:2023-01

En todos ellos se hace necesario el uso de aparatos que reproducen artificialmente las condiciones reales en las que los agentes de deterioro actúan. Por ello a estos ensayos se les denomina **ensayos de envejecimiento artificial**. Si, además, la cámara de envejecimiento permite realizar el ensayo en condiciones forzadas en las que la concentración o intensidad del agente de deterioro es superior a la dada de modo natural, se suele hablar de **ensayo de envejecimiento acelerado**. El menor tiempo de ensayo requerido en estos últimos es una ventaja añadida en aquellos casos en los que no sería posible realizar el ensayo dada la baja velocidad a la que avanza el proceso de deterioro de forma natural. El menor tiempo requerido para la realización de estos ensayos en laboratorio permite ampliar el abanico de agentes y condiciones de deterioro a ensayar. Otra ventaja de estos ensayos, como se señaló previamente, es que algunas variables extrañas⁷ medioambientales, como temperatura o humedad, pueden mantenerse constantes, lo que permite estudiar el efecto directo causado por el agente contaminante que se simula en el ensayo. No obstante, debe tenerse en cuenta que no necesariamente se cumple la ley de la aditividad cuando diversos agentes de deterioro actúan simultáneamente, ya que, por lo general, suelen producirse sinergias entre ellos que hacen que sus efectos se potencien al actuar simultáneamente.

Otro problema añadido, cuando se realizan ensayos de envejecimiento acelerado, es la correlación entre los resultados obtenidos en este experimento de simulación y los valores reales que se obtendrían con un envejecimiento natural. La **ley de equivalencia** suele establecerse de modo experimental, aunque también se han desarrollado algunos modelos teóricos para ciertos agentes de deterioro. La exposición a fuentes de radiación luminosa intensa es un buen ejemplo.

Todas las equivalencias entre exposición en condiciones naturales y en condiciones de envejecimiento acelerado están basadas en un modelo lineal de correlación entre la exposición y la intensidad de la radiación, también conocido como **Principio de reciprocidad** o **Ley de Bunsen-Roscoe** (Bunsen y Roscoe, 1862) que viene descrito matemáticamente por la ecuación (6.28):

$$E = I \times t \quad (6.28)$$

Donde E es la exposición real del objeto entendida como el tiempo que el objeto estuvo expuesto a la fuente natural o artificial de radiación en unas determinadas condiciones, I es la intensidad de la fuente artificial usada en el ensayo de envejecimiento acelerado y t es el tiempo de exposición en la cámara de envejecimiento. Partiendo de este modelo teórico, en 1967, Thomson estableció experimentalmente un valor anual de fotoexposición en la National Gallery de Londres. Este autor definió el **año-museo**, como la exposición de un objeto a la luz natural indirecta en el interior de una sala. El año-museo fue adoptado como la unidad de referencia para ensayos de envejecimiento acelerado por exposición a fuentes intensas de radiación luminosa. De esta manera, 1 año-museo equivale a una exposición de 1,5 Mlxh (1,5 millones de luxhora). Whitmore y Colaluca en 1995 establecen que 1 año-museo equivale a 2950 h de exposición a 150 lux con $75 \mu\text{Wlumen}^{-1}$ de intensidad en el UV cercano. Según esta última equivalencia 1 año-museo correspondería a 4 horas de exposición utilizando una lámpara de arco de Xenon (Doménech-Carbó *et al.*, 2011).

Los ensayos de envejecimiento artificial acelerado permiten obtener una estimación de la tendencia a la degradación del material en un tiempo mínimo que, a su vez, permite clasificar los materiales en función de su tendencia al deterioro. Continuando con el ejemplo de la radiación luminosa, la tabla 6.18 muestra la clasificación propuesta por Feller para todo tipo de objetos fotodeteriorables y la equivalencia con las clasificaciones más utilizadas para medir la estabilidad a la luz de colorantes y pinturas (Feller, 1994).

Tabla 6.18 clasificación propuesta por Feller para todo tipo de objetos fotodeteriorables y la equivalencia con las clasificaciones de estabilidad a la luz más utilizadas para medir la estabilidad de colorantes y pinturas.

Clase	Clasificación	Vida media	Equivalencia con clasificación norma Blue Wool (AATCC) ^a	Equivalencia con clasificación norma ASTM ^b D4303-10(2022)
T	Efímeros	< 6 meses	1	V
C	Inestable	< 20 años	2,3	IV
B	Intermedio	20 a 100 años	4 a 6	III
A	Excelente	A2 >100 años	7	II
		A1 >500 años	8	I

^aAmerican Association of Textile Chemists and Colorists.

^bAmerican Standard of Testing Materials.

6.3.4. Campañas de exposición de probetas. Exposición a la atmósfera exterior

La alternativa a los ensayos de laboratorio es la realización de campañas de exposición de probetas en condiciones reales. Este tipo de experimentos puede realizarse tanto en ambientes interiores como exteriores. Con estos ensayos es posible establecer el comportamiento de los materiales a los agentes medioambientales a través de la determinación de la función dosis-respuesta para un material específico. La tabla 6.19 muestra las normas más importantes que se han publicado para estandarizar estos ensayos.

Tabla 6.19. Ensayos de corrosión atmosférica para el estudio de la estabilidad de metales (UNE Asociación Española de Normalización, n.d.).

Denominación del ensayo	Norma
Metales y aleaciones. Ensayos de corrosión atmosférica. Requisitos generales.	UNE-EN ISO 8565:2012
Corrosión de metales y aleaciones. Clasificación de la baja corrosividad de las atmósferas de interior. Parte 1: Determinación y estimación de la corrosividad de las atmósferas de interior.	UNE-EN ISO 11844-1:2020
Corrosión de metales y aleaciones. Clasificación de la baja corrosividad de las atmósferas de interior. Parte 2: Determinación del ataque por corrosión en las atmósferas de interior.	UNE-EN ISO 11844-2:2020
Corrosión de metales y aleaciones. Clasificación de la baja corrosividad de las atmósferas de interior. Parte 3: Medición de los parámetros ambiental que afectan a la corrosividad de las atmósferas de interior.	UNE-EN ISO 11844-3:2020
Corrosión de metales y aleaciones. Vocabulario.	UNE-EN ISO 8044:2020
Corrosión de metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Clasificación, determinación y estimación.	UNE-EN ISO 9223:2012
Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Valores de referencia para las categorías de corrosividad.	UNE-EN ISO 9224:2012
Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Medida de los parámetros ambientales que afectan a la corrosividad de las atmósferas.	UNE-EN ISO 9225:2012
Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Determinación de la velocidad de corrosión de las probetas de referencia para la evaluación de la corrosividad.	UNE-EN ISO 9226:2012
Corrosión de los metales y aleaciones. Eliminación de los productos de corrosión sobre las probetas de ensayo de corrosión. (ISO 8407:2021).	UNE-EN ISO 8407:2021
Corrosión de los metales y aleaciones. Determinación de la corrosión bimetalica mediante ensayos de exposición a corrosión atmosférica.	UNE-EN ISO 7441:2015

Conservation of Cultural Heritage - Guidelines and procedures for DIN EN 16163:2023-01 choosing appropriate lighting for indoor exhibitions.

Estos experimentos también permiten efectuar clasificaciones de los ambientes y condiciones de exposición en diferentes localizaciones geográficas en función de su grado de agresividad o capacidad de promoción de deterioros. En la norma UNE-EN ISO 9223:2012 se establecen seis categorías principales de ambientes corrosivos, tal como muestra la tabla 6.20:

Tabla 6.20. Categorías de ambientes corrosivos.

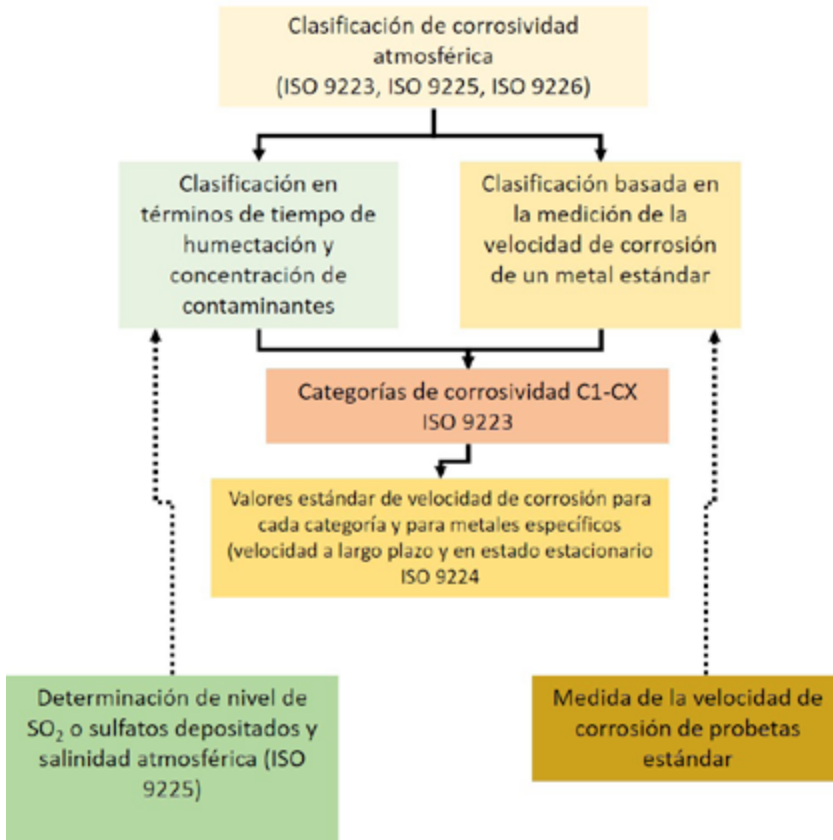
Categoría	Descripción
C1	Muy baja
C2	Baja corrosividad
C3	Moderada corrosividad
C4	Alta corrosividad
C5	Muy alta corrosividad
Cx	Extrema

El sistema de clasificación estandarizado ha sido diseñado con el propósito de unificar criterios a la hora de caracterizar corrosividades con este tipo de ensayos. Este sistema metodológico ha sido elaborado por el Grupo de Trabajo ISO/TC 156/WG 4 “Atmospheric corrosion testing and classification of corrosivity of atmosphere”. El **sistema de clasificación estandarizado** es un conjunto de normas, con una estructura consistente, que reúne los requerimientos de los sistemas experimentales diseñados para el estudio del comportamiento de los materiales (figura 6.11). El sistema de clasificación estandarizado atiende los siguientes criterios (Knotkova y Kreislova, 2007):

- Permite la comparación de la corrosividad a partir de los niveles anuales de tres factores medioambientales determinantes del comportamiento del material y, paralelamente, a partir de resultados obtenidos en ensayos de campo, de un año de duración, para medir la corrosividad.
- Permite asociar las categorías de corrosión con la velocidad de corrosión adquirida en la fase segunda estacionaria o del largo plazo de los modelos de cinética de corrosión (capítulo 7).
- Incluye métodos para la medición de concentraciones de contaminantes de bajo coste y fácil aplicación.

Figura 6.11. Esquema de procedimientos para la determinación de velocidades de corrosión y de la corrosividad. Adaptado de Knotkova y Kreislova (2007).

Como se muestra en la figura 6.11, estos ensayos estandarizados pueden realizarse



mediante dos diferentes metodologías: a) efectuando mediciones directas de la velocidad de corrosión del metal o b) midiendo los niveles de los parámetros medioambientales determinantes de los procesos de corrosión.

Clasificaciones basadas en la medición de la velocidad de corrosión de metales

La tabla 6.21 muestra la clasificación que se establece para el acero a partir de los valores experimentales obtenidos mediante medición directa de la velocidad de corrosión de probetas expuestas al ambiente exterior. La velocidad de corrosión se determina midiendo el adelgazamiento de las probetas expuestas, una vez eliminados todos los productos de corrosión formados en su superficie. La agresividad del medioambiente se clasifica en los cinco niveles básicos que se asocian a diferentes ambientes rurales, urbanos, industriales, marinos, secos y combinaciones de estos. Las velocidades de corrosión crecientes se correlacionan con niveles de SO₂ en aire, también determinados experimentalmente. La tabla 6.22 resume los valores de velocidad de corrosión asignados a las tres categorías de corrosividad más habituales, C2, C3 y C4, para tres metales de gran interés y amplio uso, acero, cobre y zinc.

Tabla 6. 20. Categorías de corrosividad establecidas en UNE-EN ISO 9223:2012.

Categoría de corrosividad	Corrosividad Pérdida de espesor ($\mu\text{m año}^{-1}$)		Nivel de contaminantes ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Condiciones estándar	
				Exterior	Interior
C1	Muy baja	Acero < 1,3	-	Zonas secas o frías; contaminación y tiempos de humectación muy bajos. Desiertos, Antártida	Espacios caldeados con baja humedad y contaminación despreciable
C2	Baja corrosividad	Acero 1,3-25	Atmósfera con contaminación baja $\text{SO}_2 < 12$; $\text{NO}_2 < 25$; $\text{PM}_{10} < 10$	Pequeñas ciudades, áreas rurales	Espacios no caldeados, humedad y temperatura variable, baja frecuencia de condensación y contaminación
C3	Moderada corrosividad	Acero 25-50	Atmósfera con contaminación moderada SO_2 : 12-40 y algún efecto de cloruros; NO_2 : 20-85; PM_{10} : 10-30	Áreas urbanas, áreas costeras con baja deposición de cloruros	Espacios con contaminación y frecuencia de condensación moderada causadas por la producción industrial
C4	Alta corrosividad	Acero 50-80	Atmósfera con contaminación alta SO_2 : 40-80; NO_2 : 85-150; PM_{10} : 30-70 o efecto importante de cloruros	Áreas urbanas contaminadas, áreas industriales, áreas costeras sin spray de agua salada	Espacios con frecuencia de condensación y contaminación elevadas causadas por producción industrial
C5	Muy alta corrosividad	Acero 80-200	Atmósfera con contaminación alta SO_2 : 80-250; $\text{NO}_2 > 150$; $\text{PM}_{10} > 70$ o efecto importante de cloruros	Áreas contaminadas industriales, áreas costeras con spray de agua salada	Espacios con casi permanente condensación y contaminación elevada causada por producción industrial
CX	Extrema	Acero 200-700	Atmósfera con contaminación alta $\text{SO}_2 > 250$ y efecto importante de cloruros	Áreas industriales, áreas costeras tropicales y subtropicales con elevados TOW y con spray de agua salada	

Tabla 6.21. Clasificación en categorías de corrosividad ISO 9223:2012.

Categoría de corrosividad		Pérdida de masa (g m ⁻² año ⁻¹)	Pérdida de espesor (μm año ⁻¹)	Nivel de contaminante (μg m ⁻³)	Ejemplos
C1		Acero <10, zinc <0,7, cobre <0,9	Acero <1,3, zinc <0,1, cobre <0,1	Atmósfera con contaminación baja (SO ₂ <20)	Áreas rurales
C2	Baja corrosividad	Acero 10-200, zinc 0,7-5, cobre 0,9-5	Acero 1,3-25, zinc 0,1-0,7, cobre 0,1-0,6	Atmósfera con contaminación baja (SO ₂ <20)	Pequeñas ciudades, áreas rurales
C3	Moderada corrosividad	acero 200-400, zinc 5-15, cobre 5-12	Acero 25-50, zinc 0,7-2,1, cobre 0,6-1,3	Atmósfera con contaminación moderada (SO ₂ : 20-40 y algún efecto de cloruros)	Áreas urbanas, áreas costeras con baja deposición de cloruros
C4	Alta corrosividad	acero 400-650, zinc 15-30, cobre 12-25	Acero 50-80, zinc 2,1-4,2, cobre 1,2-2,8	Atmósfera con contaminación alta (SO ₂ : 40-80 o efecto importante de cloruros)	Áreas urbanas contaminadas, áreas industriales, áreas costeras sin spray de agua salada
C5	Muy alta corrosividad	acero >650, zinc >30, cobre >25	Acero 80-200, zinc 4,2-8,4, cobre 2,8-5,3	Atmósfera con contaminación alta (SO ₂ : 80-200 o efecto importante de cloruros)	Áreas industriales, áreas costeras con spray de agua salada

Clasificaciones basadas en parámetros medioambientales

Los tres parámetros medioambientales que son utilizados en este tipo de clasificaciones de la corrosividad son el tiempo de humectación, la concentración de gases sulfurosos en el aire y la salinidad atmosférica. El tiempo de humectación (TOW, por sus siglas en inglés) viene expresado en número de horas (días) al año con un valor de HR>80 % y temperatura >0 °C o, alternativamente, en número de horas (días) al año que registran precipitaciones superiores a 0,2 mm (Rivero *et al.*, 2007). La concentración de gases sulfurosos viene dada como contenido en aire de SO₂ (μg m⁻³) o como deposición de SO₄²⁻, expresada en mg de sulfato depositados en la unidad de área y día. La salinidad aerotransportada es expresada en mg de iones cloruro (Cl⁻) depositados en la unidad de área en un día. Siguiendo esta metodología, la tabla 6.23 muestra los valores de parámetros medioambientales que corresponden a las categorías principales que establece la norma UNE-EN ISO 9223:2012.

Tabla 6.23. Clasificación de corrosividades en función de parámetros medioambientales. Adaptada de Knotkova y Kreislova (2007).

Concentración de SO ₂			Concentración Cl ⁻		TOW	
Clasificación	µg m ⁻³	mg m ⁻² d ⁻³	Clasificación	mg m ⁻² d ⁻¹	Clasificación	h año ⁻¹
P ₀	<12	<10	S ₀	<3	τ ₁	<10
P ₁	12-40	10-35	S ₁	3-60	τ ₂	10-250
P ₂	40-90	35-80	S ₂	60-300	τ ₃	250-2.500
P ₃	90-250	80-200	S ₃	300-1500	τ ₄	2.500-55.000
					τ ₅	>55.000

En la tabla 6.24 se presenta una clasificación de las corrosividades más elaborada ya que divide los ambientes en función de los niveles de velocidad de deposición de SO₄²⁻ y Cl⁻, lo cual permite distinguir subclases, dentro de cada clase primaria, e incorporar una nueva clase mixta donde se incluyen los ambientes con valores más altos de velocidad de deposición de ambos iones.

Tabla 6.24. Clasificación de ambientes corrosivos según norma ISO 9223:2012.

Tipo de atmósfera	Denominación	Velocidad de deposición	
		Cl ⁻ (mg m ⁻² día ⁻¹)	SO ₂ (mg m ⁻² día ⁻¹)
Rural	S ₀ P ₀	S3	P10
Urbana e industrial	S ₀ P ₁	S3	10<P35
	S ₀ P ₂	3<S60	35<P80
Marina	S ₁ P ₀	60<P300	P10
	S ₂ P ₀	300<P500	P10
	S ₃ P ₀	35<P80	P10
Mixta	S ₁ P ₁	3<S60	10<P35
	S ₁ P ₂	3<S60	35<P80
	S ₂ P ₁	60<P300	10<P35
	S ₂ P ₂	60<P300	35<P80

La norma ISO 8565:2012 (tabla 6.19) proporciona información sobre los requisitos generales necesarios para elaborar ensayos de campo. Básicamente, se prescribe elaborar probetas con materiales de referencia de composición bien conocida, forma plana o tubular y dimensiones dentro de unos valores recomendados y exponerlas en un bastidor o parrilla orientada al sur y formando un ángulo de 45°, en condiciones de exposición total y exposición al abrigo, comenzando preferiblemente en el período menos favorable (primavera u otoño) (figura 6.12). Tras el periodo prefijado de exposición, se elimina toda la capa de corrosión depositada en la superficie y se determina la masa de material perdida por las probetas siguiendo la norma ISO 8407:2021 (tabla 6.19). En paralelo, se determinan las concentraciones de contaminantes atmosféricos gaseosos y las velocidades de deposición de iones cloruro y sulfato siguiendo la norma ISO 9225:2012 (Vidal *et al.*, 2019).

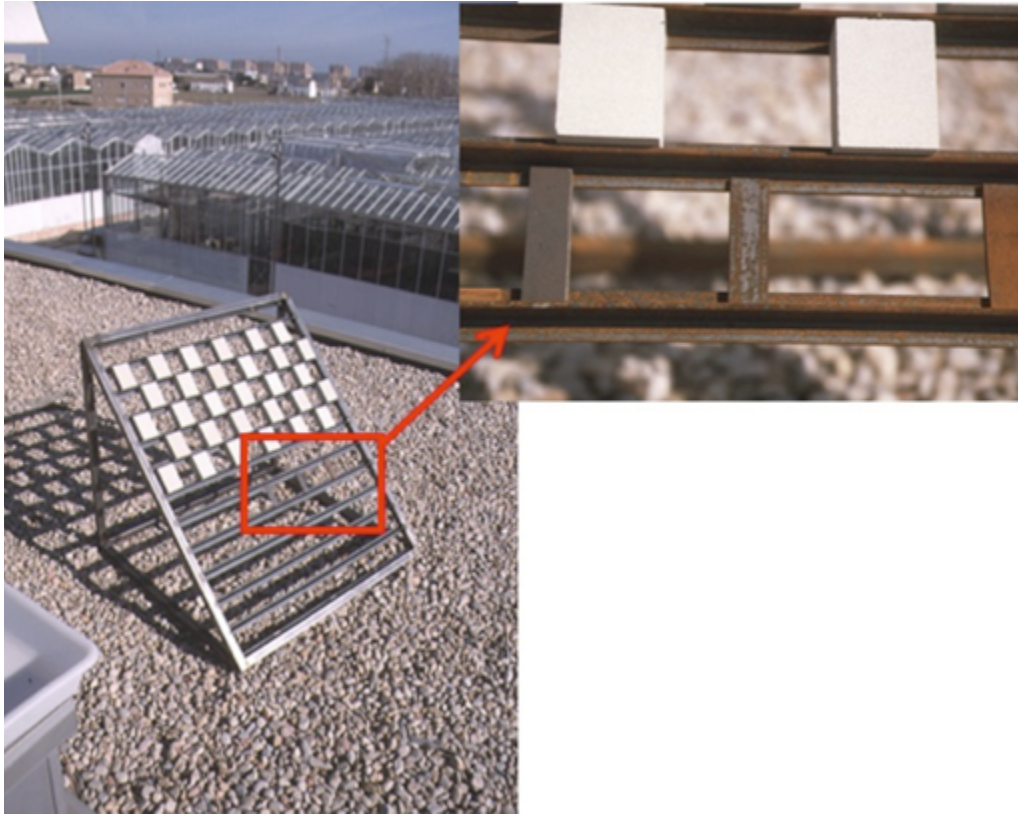


Figura 6.12. Imagen de un bastidor orientado al sur en el que se han dispuesto probetas de piedra y de diferentes metales a la latitud del lugar ($\sim 45^\circ$) en una campaña de exposición que se inició en la Universitat Politècnica de València (UPV) en el año 1998 para evaluar el efecto adverso de los contaminantes atmosféricos sobre la colección de escultura contemporánea al aire libre del Fondo de Arte y Patrimonio de la UPV. A la derecha detalle de las probetas metálicas.

Con los valores experimentales obtenidos en estos estudios de campo y aplicando la clasificación de corrosividades estandarizada, se pueden confeccionar **mapas de corrosividad**. Estos mapas de corrosividad se construyen a partir de los datos obtenidos en las campañas, que suelen tener una duración de cinco años o más. Los datos procesados proporcionan valores de corrosividad que permiten catalogar la localización de acuerdo a las clasificaciones estándar dadas en la norma UNE-EN ISO 9223:2012 (Chico *et al.*, 2010; Morcillo y Feliu, 1993). A nivel internacional y europeo se han desarrollado diversos proyectos, siguiendo estas metodologías, que han permitido construir mapas de corrosión por todo el mundo, por ejemplo, los programas ISO CORRAG, UNE/ECE, MICAT, OSD o RPF (Cai *et al.*, 2020; Prosek y Tidblad, 2021; Slamova, 2012).

6.3.5. Campañas de exposición de probetas. Exposición a la atmósfera interior

La norma UNE-EN ISO 11844:2020 establece el sistema de clasificación estandarizado para corrosividades en el interior de edificios y lugares resguardados del exterior (SCECAI),

ya que el sistema propuesto para el exterior en la norma UNE-EN ISO 9223:2012 no permite detectar los niveles de concentración de contaminantes, sensiblemente inferiores, que se registran en el interior. Otro aspecto que diferencia este tipo de ambientes es que, a las emisiones producidas por las fuentes externas, hay que sumar las producidas por los materiales de construcción y objetos alojados en el interior de los edificios, así como por la actividad humana desarrollada en ellos, que contribuyen con contaminantes específicos y diferentes a los procedentes del exterior. Entre los contaminantes específicos más frecuentemente identificados en estos ambientes cabe mencionar, ácido acético, ácido fórmico, formaldehído, acetaldehído, VOCs y ácido sulfhídrico. La norma UNE-EN ISO 11844:2020 consta de tres partes (tabla 6.19), y en ella se detallan las características del SCECAI. La figura 6.13 muestra, esquemáticamente, la estructura coherente del SCECAI.

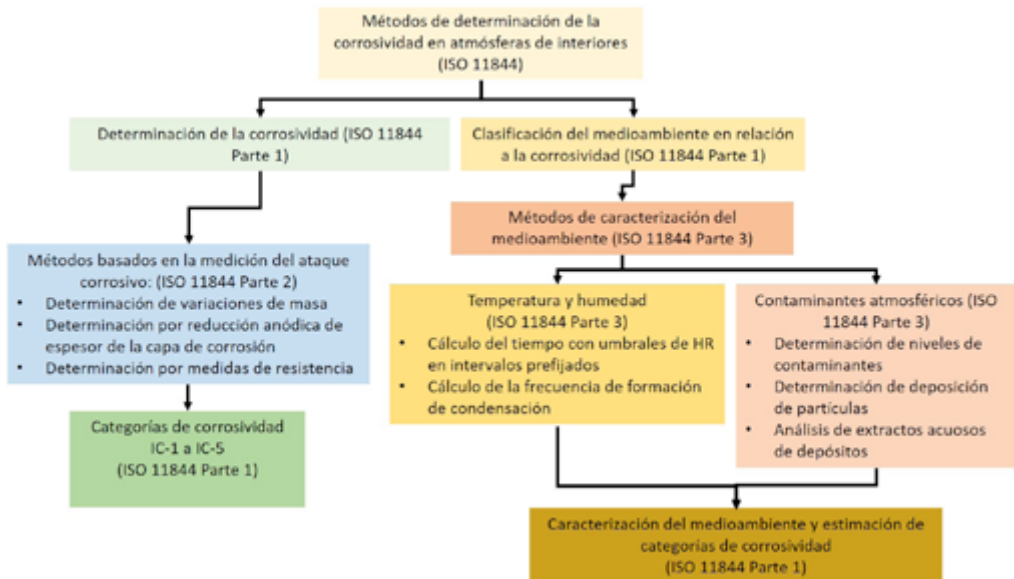


Figura 6.13. Esquema de procedimientos para la determinación de la corrosividad en el interior de edificios y lugares resguardados del exterior establecidos en el SCECAI. Adaptado de Knotkova y Kreislova (2007).

Como se muestra en la figura 6.13, la determinación de la corrosividad en ambientes interiores se basa en campañas de exposición de probetas en estos ambientes para evaluar el ataque sufrido por ciertos materiales de referencia usados para elaborar las probetas. La tabla 6.25 muestra la clasificación por categorías de ambientes interiores (IC_i) y las velocidades de corrosión asociadas utilizando probetas de cobre y plata como materiales estándar.

Tabla 6.25. Clasificación de corrosividad en ambientes de interior a partir de la determinación de la medición de la velocidad de corrosión (UNE-EN ISO 11844:2020). Adaptado de Knotkova y Kreislova (2007).

Categoría		Velocidad de corrosión (mg m ⁻² año ⁻¹)		Características del ambiente	
Índice	Corrosión	Cobre	Plata	Climatizado	No climatizado
IC1	Muy baja	<50	170	HR<40 %, nivel bajo de contaminantes, sin contaminantes específicos.	Deshumidificación, nivel bajo de contaminantes, sin contaminantes específicos.
IC2	Baja	50-200	170-670	HR<50 % pero con fluctuaciones, nivel bajo de contaminantes, sin contaminantes específicos.	Variaciones de temperatura y HR, nivel bajo de contaminantes, sin contaminantes específicos.
IC3	Moderada	200-900	670-3000	Fluctuaciones de temperatura y HR, nivel medio de contaminantes, riesgo bajo de contaminantes específicos.	50<HR<70 %, fluctuaciones de HR, nivel alto de contaminantes, riesgo bajo de contaminantes específicos.
IC4	Alta	900-2000	3000-6700	Fluctuaciones de temperatura y HR, nivel elevado de contaminantes, incluyendo contaminantes específicos.	HR>70 %, riesgo de condensación, nivel medio de contaminantes, riesgo de contaminantes específicos.
IC5	Muy alta	2 0 0 0 - 5000	6 7 0 0 - 16700	HR con influencia limitada, nivel muy elevado de contaminantes, incluyendo contaminantes específicos.	HR>70 %, riesgo de condensación, nivel muy alto de contaminantes, incluyendo contaminantes específicos.

En relación a la monitorización de la calidad del aire en colecciones exhibidas en el interior de edificios u otros lugares resguardados del exterior, Grzywacz (2006) propone un modelo fundamentado en la evaluación de la eficiencia del edificio para proteger los bienes culturales. Este método se basa en determinar la relación entre los niveles de los diferentes contaminantes atmosféricos en el interior (*I*) y en el exterior (*E*) con mediciones separadas. En el interior, a su vez, se establecen tres niveles de comparación diferenciados: 1) el ambiente del interior del edificio respecto al exterior; 2) un microclima (por ejemplo,

un ala del edificio con respecto al edificio); 3) una sala A del edificio respecto a otra sala B. De acuerdo a este sistema, este autor propone un esquema de planificación para caracterizar la calidad del aire en interiores (figura 6.14):

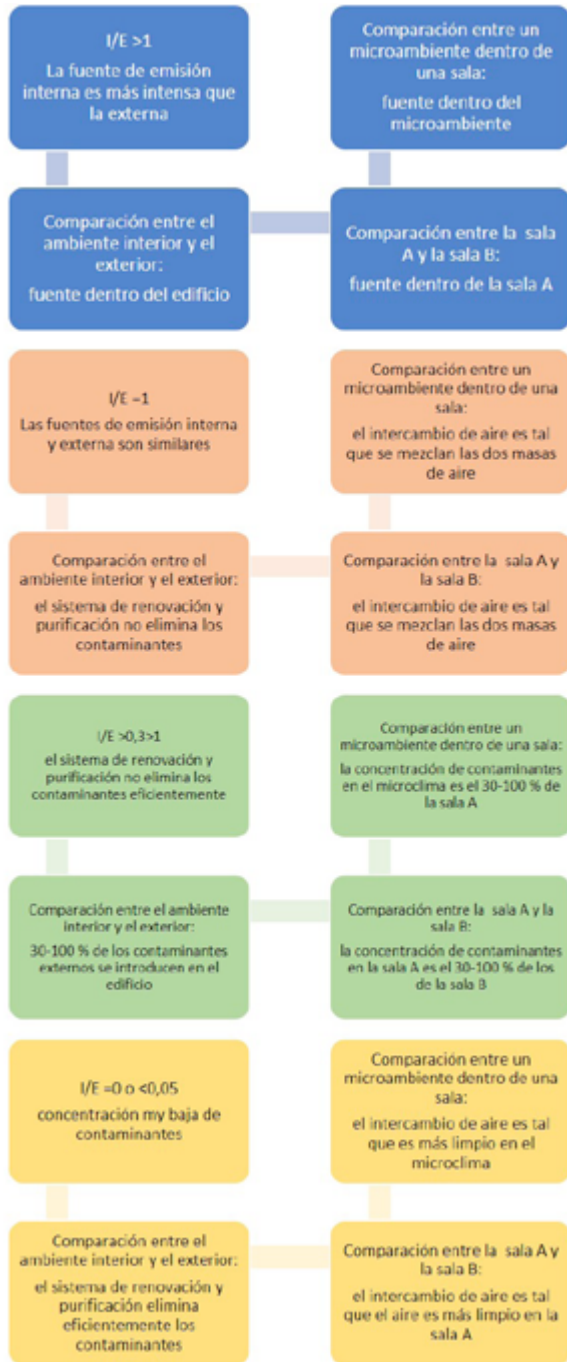


Figura 6.14. Planificación del proceso de determinación de la calidad del aire en interiores.

En paralelo a la instalación de métodos de monitorización directa en continuo de las concentraciones de contaminantes atmosféricos, se han propuesto otros métodos para evaluar la agresividad de ambientes interiores que, por su simplicidad y bajo coste, pueden resultar muy útiles. Los sistemas de análisis *in situ* y muestreadores o sensores pasivos permiten detectar y/o cuantificar diversos gases contaminantes, tanto de naturaleza orgánica como ácido acético, ácido fórmico, formaldehído, acetaldehído y contenido total de VOCs, como compuestos inorgánicos tales como ácido sulfhídrico, NO₂, NO/NO_x, ozono y SO₂. Estos dispositivos tienen diferente nivel de complejidad. Los más sencillos proporcionan una identificación cualitativa y consisten en simples tiras reactivas como las tiras A-D, diseñadas en el Rochester Institute for Technology, que detectan el ácido acético liberado por adhesivos y films de acetato de celulosa. Los analizadores semicuantitativos para análisis *in situ* son dispositivos pasivos más elaborados. Los más simples son cartuchos de pequeño tamaño en cuyo interior se hallan los reactivos. El receptáculo interno, donde están alojados los reactivos en el interior del cartucho, es abierto en el momento de efectuar la medición para que el gas contaminante reaccione durante un tiempo prefijado por el fabricante. Al finalizar el ensayo, una escala de color, incorporada en el exterior del envase, permite determinar la concentración del contaminante (Grzywackz, 2006). El test de Oddy es un método diseñado para estudiar la capacidad de alterar metales que poseen ciertos materiales utilizados en la fabricación de los muebles y revestimientos murales de las salas de exposición (Oddy, 1975; Banberger *et al.*, 1990; Robinet y Thickett, 2003; Wang *et al.*, 2011). Como muestra la figura 6.15, el dispositivo consiste en un tubo de ensayo en cuyo interior se coloca una pequeña placa de metal (acero, hierro, cobre) y una pieza del material a investigar, potencialmente dañino, junto con un diminuto recipiente relleno de agua, recubierto de una bola de algodón. Este último dispositivo permite mantener una humedad relativa del 100 % en el interior del tubo de ensayo una vez sellado. Tras veintiocho días de exposición se valora el ataque sufrido por el testigo de metal. Según los resultados obtenidos, el material sometido a examen se clasifica en tres niveles de agresividad: (*P*) permanente, si no se observa corrosión; (*T*) Apropiado para uso temporal, si se observa un ligero ennegrecimiento o película de corrosión o una decoloración y (*U*) inapropiado, si la corrosión es claramente visible. Dependiendo del metal elegido se puede identificar el agente contaminante responsable de la corrosión: las probetas de plomo se usan para identificar la presencia de aldehídos y ácidos volátiles; usando probetas de cobre se identifican cloruros, cloruro de hidrógeno, NO_x, dióxido de azufre y otros compuestos de azufre; si la probeta es de plata se identifican contaminantes reductores como el sulfuro de hidrógeno o el sulfuro de carbonilo.

Unas tiras reactivas impregnadas con rojo de clorofenol+azul de bromotimol+verde de bromocresol+ rojo fenol, expuestas al ambiente durante 24 horas, permiten medir el pH si se sospecha que el cemento u hormigón en edificios de nueva construcción puede afectar los objetos debido a su humedad y alcalinidad (Kenjo, 1986).

Un método, igualmente simple, consiste en exponer tiras de papel de 1 cm de ancho, impregnadas en aceite de linaza, durante 10 días. Con ayuda de un espectrofotómetro se calcula el **índice de amarilleamiento** (*YI*) que viene definido por la ecuación:

$$YI = 100Y - 84.67Z \quad (6.29)$$

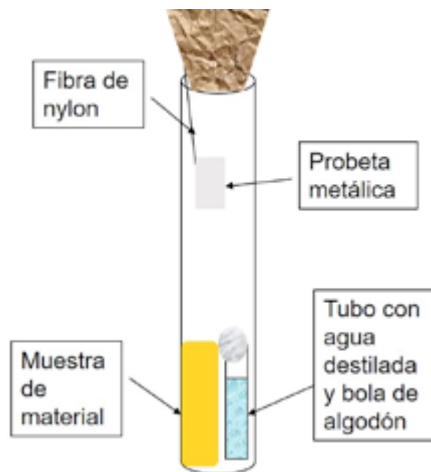


Figura 6.15. Diseño experimental del test de Oddy.

Donde Y y X son los valores triestímulo. El papel impregnado con aceite, secado previamente, puede usarse como indicador cuando adquiera un valor de $YI = 20$. La tabla 6.26 muestra los valores promedio de YI estimados para diferentes períodos de tiempo (Kenjo, 1986).

Tabla 6.26. Valor promedio estimado de YI y color del aceite de linaza para hormigones de diferente antigüedad (Kenjo, 1986).

Índice de amarilleamiento	Color	Antigüedad del hormigón
>40	Rojizo-marrón	Hormigón de un año
40-30	Marrón	Hormigón de dos años
<30	Amarillo a amarillo claro	Atmósfera en presencia de madera

La influencia de la radiación luminosa en la región visible se puede evaluar con tiras de papel impregnadas con rodamina B disuelta en alcohol al 1% v/v (Kenjo, 1986). Este reactivo es sensible a la radiación en el rango 338-596 nm, que incluye la mayor parte de la región visible.

De modo similar al anterior, la influencia de la radiación luminosa ultravioleta se puede caracterizar con tiras de papel impregnadas con litargirio dispersado en una solución acuosa de cola animal al 10 %. Esta combinación es sensible a la radiación visible por debajo de 440 nm y estable a la radiación visible por encima de 498 nm (Kenjo, 1986).

Matthiesen (2007) ha propuesto diversos métodos que permiten determinar velocidades de oxidación de materiales con superficies irregulares efectuando mediciones *in situ* en el propio material, si no es posible la toma de muestras. El análisis se realiza con un instrumento denominado **microfading tester**. El método consiste en irradiar directamente el material sobre un área de pequeño tamaño utilizando con una fuente intensa de luz incorporada en el instrumento y, en paralelo, medir la radiación reflejada por el material con un detector espectrofotométrico que proporciona, en continuo, valores de reflectancia (Świt *et al.*, 2021).

6.4. Monitorización de la suciedad superficial

La formación de una película o costra de suciedad en la superficie de un bien cultural se produce por diversos mecanismos físicos de deposición, arrastre y drenado de partículas atmosféricas. En ciertos casos como las costras negras, estos mecanismos se combinan con otros procesos químicos y los productos de reacción entre los contaminantes atmosféricos y el material del sustrato se mezclan en una matriz compleja. También puede complicarse el mecanismo de formación por la presencia de microorganismos metabólicamente activos. La composición de la capa de suciedad, dependerá, por tanto, de la composición del objeto, de la composición del aire (rural, urbano, industrial, marino) y de los fenómenos meteorológicos, como humedad, temperatura, precipitaciones y viento, que pueden transportar partículas desde lugares lejanos.

La monitorización de la capa de suciedad superficial se lleva a cabo mediante medición del cambio en la reflectancia de la superficie. El instrumento más eficaz para realizar estas medidas es el espectrofotómetro. Este instrumento, no solo proporciona medias de reflectancia a cada longitud de onda en la región visible, sino que proporciona los valores de las tres coordenadas cromáticas L^* , a^* y b^* que definen el espacio CIELAB (1976) (Doménech-Carbó, 2018). La coordenada L^* proporciona una buena medida de los cambios en luminosidad asociados al oscurecimiento provocado por la capa de suciedad. Las variaciones observadas en a^* y b^* indican las derivas del color. La caracterización del cambio en el aspecto visual suele realizarse mediante el **cambio en el color total** ΔE , que viene dado por la expresión:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})} \quad (6.30)$$

Donde ΔL^* , Δa^* y Δb^* corresponden a las diferencias $L^*_{\text{final}} - L^*_{\text{inicial}}$, $a^*_{\text{final}} - a^*_{\text{inicial}}$ y $b^*_{\text{final}} - b^*_{\text{inicial}}$, respectivamente, entre la medición efectuada al final y al inicio del periodo de medición prefijado. Debe tenerse en cuenta que variaciones de ΔE por debajo del umbral 5 corresponden a modificaciones en el aspecto visual indiscernibles por el ojo humano.

6.5. Umbrales operacionales

En muchas situaciones prácticas los procesos de deterioro no pueden ser completamente eliminados y, únicamente, puede aspirarse a minimizarlos al máximo aplicando medidas para garantizar las mejores condiciones de conservación. Sin embargo, esto último puede ser inasumible económicamente. Otras veces, la imposición de condiciones más idóneas implica restricciones indeseables en el acceso al bien. Alternativamente, se han establecido los umbrales operacionales.

El **umbral operacional** se define como la dosis o concentración de un determinado agente de deterioro (contaminante o parámetro medioambiental) que permite que la velocidad de deterioro sea menos significativa que la velocidad de deterioro por otro mecanismo. También se define como la concentración de contaminante para la que el tiempo de supervivencia del objeto es suficiente. Las normas ISO incluyen valores umbral

para la corrosión del acero por SO_2 atmosférico, siendo $12 \mu\text{g m}^{-3}$ el valor umbral de concentración de gas en aire y $10 \text{ mg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ el valor umbral de deposición de sulfato, ambos valores referidos a atmósfera interior. Para atmósferas exteriores se han fijado valores umbral de concentración de gas en aire de $40 \mu\text{g m}^{-3}$ y valor umbral deposición de sulfato $35 \text{ mg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Otro ejemplo lo constituye el valor umbral del nivel de salinidad para la corrosión del acero que se ha fijado en $50 \text{ mg Cl}^- \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. No obstante, con valores de $100 \text{ mg Cl}^- \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, el efecto corrosivo ya es significativo (ASHRAE, 2003).

La tabla 6.27 muestra los umbrales operacionales para diferentes contaminantes atmosféricos gaseosos (ASHRAE, 2003).

Tabla 6.27. Umbrales operacionales para diferentes contaminantes atmosféricos gaseosos (ASHRAE, 2003).

Umbral operacional ($\mu\text{g m}^{-3}$)	100 años	10 años	1 año
Ácido acético	100	100	1000
H_2S	0,01	0,1	1
NO_2	0,1	1	10
O_3	0,1	1	10
SO_2	0,1	1	10
Partículas en suspensión (PM _{2,5})	0,1	1	10

Otro parámetro que suele utilizarse es la **velocidad de corrosión aceptable** (o de deterioro) (v_a):

$$v_a = N \times v_b \quad (6.31)$$

donde v_b es la velocidad base o velocidad a la que tiene lugar el deterioro mínimo en el bien cultural y N es un factor multiplicador. En la práctica, se suelen adoptar valores de N del orden de 1,5, 2,0 y 2,5 para los niveles de corrosividad C1 a C3 y valores 5, 10 y 20 para el nivel de corrosividad C4. En el programa UN ECE ICP "Effects on Materials Including Historic and Cultural Monuments" se fijaron unos niveles aceptables de concentración de contaminantes atmosféricos y, basándose en ellos, se establecieron valores de velocidad de corrosión base v_b para diferentes metales. En la práctica, estos valores se determinaron midiendo la velocidad de corrosión en localizaciones con un nivel muy bajo de contaminación atmosférica. La tabla 6.28 muestra los valores de v_b establecidos a partir de los resultados obtenidos en el programa UN EC ICP.

Tabla 6.28. Valores de velocidad de corrosión base establecidos en el programa UN EC ICP.

Material	Pérdida por corrosión	
	(g m ⁻² año ⁻¹)	(µg año ⁻¹)
Acero	72,0	9,16
Zinc	3,3	0,46
Cobre	3,0	0,33
Bronce	2,1	0,23
Aluminio	0,09	0,03

A partir de este concepto se han hecho estimaciones de los valores idóneos de velocidad de corrosión aceptable para diferentes materiales. La tabla 6. 29 reproduce lo valores propuestos por la Federal Environmental Agency alemana (2004).

Tabla 6.29. Valores de velocidad de corrosión aceptable. Adaptado de Federal Environmental Agency (2004).

Material	Velocidad de corrosión aceptable (µm m ⁻²)		
	N=1	N=2,5 ^a	N=2 ^b
Cobre	0,32	0,8	0,64
Bronce	0,25	0,6	0,5
Zinc	0,45	1,1	0,9
Acero	8,5	20	16
Aluminio	0,09	0,22	0,18

^aA partir de dos años.

^bA partir de treinta años

Una estrategia alternativa consiste en establecer las dosis de exposición tolerables al agente deteriorante.

El **NOAEL** (maximum dose without an effect) se define como la máxima dosis o concentración del contaminante o parámetro medioambiental para la que no se observa efecto adverso. Por ejemplo, el cuero no sufre efectos adversos en 100 años cuando se expone a concentraciones de SO₂ por debajo de 0,06 ppb.

El **LOAEL** (lowest observed adverse effect level) se define como la mínima dosis o concentración del contaminante o parámetro medioambiental correspondiente al más bajo nivel observado del efecto adverso. Por ejemplo, para objetos de plata el LOAEL del agente de deterioro H₂S es 0,272 ppb, pues, expuesto a esa concentración, se aprecia mínima formación de sulfuro de plata.

6.6. Referencias

Agencia Estatal de Meteorología (2023) Datos y estadísticas en abierto. Disponible en: https://www.aemet.es/es/lineas_de_interes/datos_y_estadistica. [Consultado 13-05-2023].

ASHRAE (2003) "Museums, libraries and archives". En: *ASHRAE Applications Handbook (SI Edition)*. American Atlanta: Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 21.1-21.16.

Askey, A., Lyon, S.B., Thompson, G.E., Johnson, J.B., Wood, G.C., Cooke, M. y Sage, P. (1993) "The corrosion of iron and zinc by atmospheric hydrogen chloride", *Corrosion Science*, 34(2), pp. 233-247.

Banberger, J.A., Howe, E.C. y Wheeler, G. (1990) "A Variant Oddy Test Procedure for Evaluating Materials Used in Storage and Display Cases", *Studies in Conservation*, 44, pp. 86-90.

Bunsen, R.W. y Roscoe, H.E. (1862) "Investigaciones fotoquímicas-Parte V. Sobre la medición de la acción química de la luz solar directa y difusa", *Actas de la Royal Society*, 12, pp. 306-312.

Cai, Y., Xu, Y., Zhao, Y. y Ma, X. (2020) "Atmospheric corrosion prediction: a review", *Corrosion Reviews*, 38(4), pp. 299-321, y las referencias incluidas en el artículo.

Calvo Gordaliza, A.I., Castro Izquierdo, A. y Fraile Ruíz, R. (2009) "Caracterización del aerosol marino", *Boletín de la Sociedad Española de Hidrología Médica*, 24, pp. 8-19.

Chico, B., de la Fuente, D., Vega, J.M. y Morcillo, M. (2010) "Mapas de España de corrosividad del zinc en atmósferas rurales", *Revista de Metalurgia*, 46(6), pp. 485-492.

Consellería de Medio Ambiente e Ordenación do Territorio- Xunta de Galicia (2015) *PM10 y PM2,5 en ES1219: Área Metropolitana de A Coruña en 2015 y la influencia del aerosol marino Superaciones del VLD en la estación 15030027 - Torre de Hércules (A Coruña)*. Xunta de Galicia. Disponible en: https://www.meteogalicia.gal/datosred/infoweb/caire/informes/ESTUDIO/GL/Informe_Aerosol_Marino_Coruna_2015.pdf. [Consultado el 18-05-2023].

DIN EN ISO 29464:2020 Limpieza del aire y otros gases. Terminología. Disponible en: <https://www.une.org>. [Consultado el 18-05-2023].

Doménech-Carbó, M.T. (2018) *Análisis químico y examen científico de patrimonio cultural*. Madrid: Síntesis.

Doménech-Carbó, M.T., Silva, M.F., Aura-Castro, E., Fuster-López, L., Kröner, S., Martínez-Bazán, M.L., Mas-Barberá, X., Mecklenbrug, M.F., Osete-Cortina, L., Domenech, A., Gimeno-Adelantado, J.V. y Yusa-Marco DJ. (2011) "Study of behaviour on simulated daylight ageing of artists' acrylic and poly(vinyl acetate) paint films", *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 399, pp. 2921-2937.

Environmental Protection Agency (2023) *US National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) Air Quality Standards*. Disponible en: <http://www.epa.gov/air/criteria.html>. [Consultado 1-05-2023].

European Committee for Standardization (2014) EN 16141:2014: Conservation of cultural heritage-Guidelines for management of environmental conditions- Open storage facilities: definitions and characteristics of collection centres dedicated to the preservation and management of cultural heritage. European Committee for Standardization (CEN),

Brussels. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?> [Consultado 9-05-2023].

European Committee for Standardization (2016) EN 15999-1:2016: Conservation of cultural heritage-Guidelines for design of showcases for exhibition and preservation of objects-Part 1: General requirements (2014). European Committee for Standardization (CEN), Brussels. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?> [Consultado 9-05-2023].

European Environment Agency (2023) Air Quality Standards. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-concentrations/air-quality-standards>. [Consultado 9-05-2023].

Federal Environmental Agency (2004) *Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping*. Berlin: Umweltbundesamt. Disponible en: [http://www.icpmapping.org/Latest update Mapping Manual](http://www.icpmapping.org/Latestupdate%20Mapping%20Manual). [Consultado 13-05-2023].

Feller, R.L. (1994) *Accelerated Aging. Photochemical and thermal aspects*. Los Ángeles: Getty Institute.

Generalitat Valenciana (2023) Red valenciana de vigilancia y control de la contaminación atmosférica. Disponible en: <https://agroambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/red-valenciana-de-vigilancia-y-control-de-la-contaminacion-atmosferica>. [Consultado 13-05-2023].

Geneva Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (1983). Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/geneva-convention-on-long-range-transboundary-air-pollution.html>. [Consultado 9-05-2023].

Grzywacz, C.M. (2006) *Monitoring for Gaseous Pollutants in Museum Environments*. Marina del Rey: Getty Publications. Capítulo 5.

ICOM-UNESCO (1971) *Dossier de References Techniques*. Centre de Documentation ICOM-UNESCO, pp. 15-17.

Kenjo, T. (1986) "Certain Deterioration Factors for Works of Art and Simple Devices to Monitor Them", *The Journal of Museums Management and Curatorship*, 5, pp. 295-300.

Knotkova, D. y Kreislova, K. (2007) "Corrosivity of atmospheres—derivation and use of information". En: Moncmanova A. Ed. *Environmental Deterioration of Materials*. WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering, Vol. 28. WIT Press.

La Fontaine (1985) *Technical Bulletin Institute*. National Museums of Canadá.

Matthiesen, H. (2007) "A Novel Method to Determine Oxidation Rates of Heritage Materials in Vitro and in Situ", *Studies in Conservation*, 52, pp. 271-280.

Michalski, S. (1993) "Relative Humidity: A Discussion of Correct/Incorrect Values". *ICOM-CC 10th Meeting*. Washington D.C., Paris: ICOM-CC, pp. 624-629.

Michalski, S. (1994) Relative Humidity and Temperature Guidelines: What's Happening? Disponible en: [https://es.scribd.com/document/396814229/Relative-Humidity-and-Temperature -Guidelines-What-s-Happening-By-Stefan-Michalski#](https://es.scribd.com/document/396814229/Relative-Humidity-and-Temperature-Guidelines-What-s-Happening-By-Stefan-Michalski#). [Consultado 9-05-2023].

Ministerio de Cultura (2009) *Normas de conservación preventiva para la implantación de sistemas de control de condiciones ambientales en museos, bibliotecas, archivos, monumentos y edificios históricos*. Disponible en: <https://www.culturaydeporte.gob.es/planes-nacionales/>

dam/ jcr:a8616b46-27cb-45fd-b121-79899d8d6907/ipce-normas-climatizacion.pdf. [Consultado 9-05-2023].

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023) *Red de Seguimiento del Cambio Global en Parques Nacionales*. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/red-parques-nacionales/red-seguimiento/default.aspx>. [Consultado 13-05-2023].

Morcillo, M. y Feliu, S. (1993) *Mapas de España de corrosividad atmosférica*. Madrid: Programa CYTED.

Morcillo, M., Chico, B., de la Fuente, D. y Simancas J. (2012) "Looking Back on Contributions in the Field of Atmospheric Corrosion Offered by the MICAT Ibero-American Testing Network Atmospheric Corrosion", *International Journal of Corrosion*, 2012, pp. 824365.

Muller, C. y Thickett, D. (2014) "An Air Quality Standard for the Protection of Cultural Heritage", *Papyrus*, 15, pp. 26-29.

Nazaroff, W.W., Ligocki, M.P., Salmon, L.G., Cass, G.R., Fall, T., Jones, M.C., Liu, H.I.H. y Ma, T. (1993) *Airborne Particles in Museums*. Getty Conservation Institute.

Oddy, W.A. (1975) *Conservation in Archaeology and the Applied Arts*. Londres: IIC.

Prosek, T. y Tidblad, J. Eds. (2021) *Exposure Site Catalogue. Catalogue of atmospheric corrosion field exposure sites in Europe*. European Federation of Corrosion.

Ray, R., Lee, J.S. y Little, B.J. (2010) "Iron-Oxidizing Bacteria: A Review Of Corrosion Mechanisms In Fresh Water And Marine Environments", *Corrosion*, 14, pp. NACE-10218.

Rivero, S., Chico, B. de la Fuente y D. Morcillo, M. (2007) "Corrosión atmosférica del acero bajo en carbono en un ambiente marino polar. Estudio del efecto del régimen de vientos", *Revista de metalurgia*, 43(5), pp.370-383.

Robinet, L. y Thickett, D. (2003) "A New Methodology for Accelerated Corrosion Testing", *Studies in Conservation*, 48, pp. 263-268.

Selwyn, L.S., Sirois, P.J. y Argyropoulos, V. (1999) "The corrosion of excavated archaeological iron with details on weeping and akageneite", *Studies in conservation*, 44(4), pp. 217-232.

Sikiotis, D., Kirkitsos, P. y Delopolou, P. (1994) "Effects of air pollution on historic buildings and monuments (1986-1990). Scientific basis for conservation: Field experiment", *European cultural heritage newsletter and research*, 8, pp. 7-10.

Slamova, K., Glaser, R., Schill, C., Wiesmeier, S. y Köhl, M. (2012) "Mapping atmospheric corrosion in coastal regions: methods and results", *Journal of Photonics for Energy*, 2, pp. 022003-1-11.

Spiegel, J. y Maystre, L.Y. (1998) "Control de la contaminación ambiental". En: *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*, Vol 2. Ed. Mager Stellman, J. Organización Internacional del Trabajo, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, pp. 55.2-55.52.

Stolow, N. (1985) *Conservation and Exhibitions*. Butterworths.

Świt, P., Gargano, M. y del Hoyo-Meléndez, J.M. (2021) "Beam characterization of a microfading tester: evaluation of several methods", *Heritage Science*, 9, pp. 78.

Tan, Z. (2014) *Air Pollution And Greenhouse Gases. From Basic Concepts to Engineering Applications for Air Emission Control*. Springer.

Turgoose, S. (1985) "The Corrosion of Archaeological Iron during Burial and Treatment",

Studies in Conservation, 30(1), pp. 13-18.

Ueki, T. y Lovley, R. (2022) “*Desulfovibrio vulgaris* as a model microbe for the study of corrosion under sulfate-reducing conditions”, *mLife*, 1, 13-20.

UNE Asociación Española de Normalización (n.d.) Buscador de normas UNE AENOR. Disponible en <http://AENOR.com>. [Consultado 13-05-2023].

UNE-EN ISO 9223:2012 Corrosión de metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Clasificación, determinación y estimación. UNE Asociación Española de Normalización. Disponible en: <http://une.org>. [Consultado 6-05-2023].

UNE-EN ISO 11844-1:2020 Corrosión de metales y aleaciones. Clasificación de la baja corrosividad de las atmósferas de interior. Parte 1: Determinación y estimación de la corrosividad de las atmósferas de interior. UNE Asociación Española de Normalización. Disponible en: <http://une.org>. [Consultado 6-05-2023].

UNE-EN ISO 11844-2:2020 Corrosión de metales y aleaciones. Clasificación de la baja corrosividad de las atmósferas de interior. Parte 2: Determinación del ataque por corrosión en las atmósferas de interior. UNE Asociación Española de Normalización. Disponible en: <http://une.org>. [Consultado 6-05-2023].

UNE-EN ISO 11844-3:2020 Corrosión de metales y aleaciones. Clasificación de la baja corrosividad de las atmósferas de interior. Parte 3: Medición de los parámetros ambientales que afectan a la corrosividad de las atmósferas de interior. UNE Asociación Española de Normalización. Disponible en: <http://une.org>. [Consultado 6-05-2023].

UNE-EN ISO 8565:2012 Metales y aleaciones. Ensayos de corrosión atmosférica. Requisitos generales. UNE Asociación Española de Normalización. Disponible en: <http://une.org>. [Consultado 6-05-2023].

Upham, L.N. (1992) “The Standards Connection”, *Journal of Education for Library and Information Science*, 33(1), 72-74.

Van Grieken, V., Vleugels, G., Sweevers, E. y Dewolfs, R. (1994) “Effects of air pollution on historic buildings and monuments (1986-1990). Scientific basis for conservation: analytical study of weathering of building stones under field exposure conditions”, *European Cultural Heritage Newsletter and Research* 8, pp. 2-6.

Vidal, F., Vicente, R. y Mendes Silva, J. (2019) “Review of environmental and air pollution impacts on built heritage: 10 questions on corrosion and soiling effects for urban intervention”, *Journal of Cultural Heritage*, 37, pp. 273–295.

Wang, S., Kong, L., An, Z., Chen, J., Wu, L. y Zhou, X. (2011) “An improved Oddy Test Using Metal Films”, *Studies in Conservation*, 56, pp. 138-153.

Whitmore, P.M. y Colaluca, V.G. (1995) “The natural and accelerated aging of an acrylic artists’ medium”, *Studies in Conservation*, 40, pp. 51-64.

6.7. Bibliografía

Bartuli, C. Cigna, R. y Fumei, O. (1999) "Prediction of the durability for outdoor bronzes: estimation of the corrosivity of atmospheric environment of the Capitoline Hill in Rome", *Studies in Conservation*, 44, pp. 245-252.

Camuffo, D. (2013) *Conservation, restoration and maintenance of Indoor and Outdoor Monuments*. Elsevier.

Hamilton, R., Vladimir Kucera, V., Tidblad, J. y Watt, J. Eds. (2009) *The Effects of Air Pollution on Cultural Heritage*. Springer.

Mager Stellman, J. Ed. (1998) *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. Organización Internacional del Trabajo, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.

Sabbioni, C. (2008) "El Cambio Climático y las colecciones de los museos". En: *Dialogues for the New Century. Mesa redonda sobre la conservación del patrimonio cultural en un mundo cambiante*. IIC.

Varotsos, C., Tzanis, C. y Cracknell, A. (2009) "The enhanced deterioration of the cultural heritage monuments due to air pollution", *Environmental Science and Pollution Research* Area 6.5- Heritage Conservation-Commentary.

Capítulo 7:

Modelización del deterioro

Contenidos

- 7.1. Efectos asociados a los agentes climáticos y la contaminación
- 7.2. Modelos teóricos de cinética de la corrosión atmosférica
 - 7.2.1. Fases del proceso de corrosión atmosférica
 - 7.2.2. Modelo potencial
 - 7.2.3. Modelo lineal general o bilogarítmico
 - 7.2.4. Modelo potencial numérico
 - 7.2.5. Función dosis-respuesta
- 7.3. Modelos específicos para los agentes climáticos y la contaminación
 - 7.3.1. Humedad y precipitaciones acuosas
 - 7.3.2. Temperatura del aire
 - 7.3.3. Salinidad
 - 7.3.4. Contaminantes atmosféricos
- 7.4. Modelo de dependencia de la velocidad de corrosión con los agentes medioambientales
- 7.5. Modelos de corrosión y cambio climático
- 7.6. Referencias
- 7.7 Bibliografía

Los bienes culturales, dependiendo de su naturaleza y propiedades intrínsecas (composición, historia, etc.), exhiben una mayor o menor sensibilidad frente a los diversos agentes inductores de deterioros, por lo que la forma en la que evoluciona la alteración puede variar considerablemente, de unos casos a otros, en función del objeto y de su contexto. La modelización de los procesos de deterioro responde a la necesidad de predecir el comportamiento futuro del objeto en estudio. En general, pueden establecerse dos aproximaciones en la elaboración de un modelo teórico a partir de la combinación de las leyes y principios físicos y químicos que intervienen en el proceso: i) aplicando unas condiciones iniciales y de contorno para el sistema en estudio e ii) obteniendo experimentalmente la correlación funcional entre las variables causales y las variables de

efecto o impacto. Esto último, es lo que se conoce como función dosis-respuesta. En este capítulo se revisan los principales métodos de modelización desarrollados para describir la corrosión de metales y, en particular, los modelos desarrollados para predecir los efectos del cambio climático en metales.

7.1. Efectos asociados a los agentes climáticos y la contaminación

Por su importancia como uno de los principales efectos de los agentes de alteración de estructuras y objetos metálicos, la corrosión atmosférica ha sido objeto de abundante investigación, siendo numerosos los estudios que han intentado describir el comportamiento corrosivo de los materiales mediante modelos teóricos. Las primeras ecuaciones matemáticas describiendo los procesos de corrosión del acero fueron de tipo parabólico y se remontan a la década de 1970. A partir de estos primeros ensayos han surgido numerosos modelos que se diferencian por el tipo de ley matemática en la que se sustentan.

7.2. Modelos teóricos de cinética de la corrosión atmosférica

Muchos de los primeros modelos teóricos que se desarrollaron para describir la corrosión de metales fueron obtenidos a partir de experimentos de laboratorio o se trataba de modelos completamente empíricos, por lo que los resultados que proporcionaban podían alejarse bastante de los valores reales, sobre todo, cuando se proyectaban resultados a largo plazo. Para resolver este inconveniente se han llevado a término programas experimentales consistentes en campañas de exposición de probetas durante periodos prolongados de tiempo. Los modelos obtenidos de este modo proporcionan ecuaciones cinéticas en las que la corrosión (expresada, por ejemplo, como pérdida de masa o de espesor de la probeta) es función exclusivamente del tiempo. Sin embargo, estas funciones solo son aplicables en las mismas condiciones medioambientales en las que se obtuvo el modelo. Por este motivo, se han establecido modelos predictivos en los que la corrosión es función de diferentes variables asociadas a diversos agentes medioambientales tales como tiempo de humectación y concentraciones de cloruros y de sulfatos en aire. Las funciones obtenidas mediante este procedimiento se conocen como funciones dosis-respuesta.

7.2.1. Fases del proceso de corrosión atmosférica

Los primeros modelos desarrollados para explicar la corrosión atmosférica de los materiales y, más concretamente, de metales, se elaboraron sobre la premisa de que los cambios que experimenta el material eran dependientes del tiempo. La figura 7.1 muestra el comportamiento de probetas metálicas tras su exposición a la atmósfera durante un periodo prolongado de tiempo. Se observa que la primera parte de la curva presenta valores de pendiente elevados que, paulatinamente, van disminuyendo. Este comportamiento se corresponde con un modelo de corrosión en dos fases. Una fase inicial en la que el proceso de corrosión es rápido y una segunda fase en la que la velocidad se va reduciendo progresivamente. El comportamiento descrito para la pérdida de metal con el tiempo se ajusta a una curva parabólica cuya parte más externa se corresponde con un

estado estacionario que es alcanzado al cabo de cierto tiempo, el cual se caracteriza por un avance mucho más lento del proceso de corrosión.

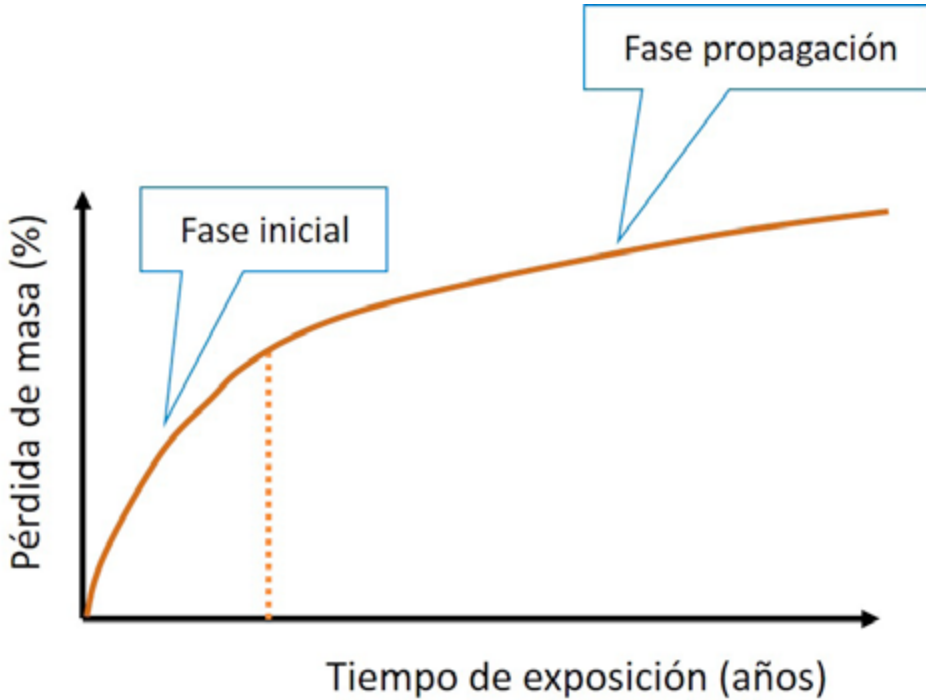


Figura 7.1. Variación de la masa de metal inalterado con el tiempo de exposición a la atmósfera.

7.2.2. Modelo potencial

El comportamiento experimental mostrado en la figura 7.1 viene descrito, matemáticamente, por una función potencial de la variable representativa del proceso de corrosión frente al tiempo,

$$c = c_0 t^n \quad \text{o bien,} \quad (7.1)$$

$$\log c = \log c_0 + n \log t \quad (7.2)$$

Donde c_0 y c son los valores en el instante inicial y tras un periodo de exposición t , respectivamente, de la variable representativa de la corrosión, por ejemplo, masa de la probeta de metal o espesor de la probeta metálica una vez eliminados los productos que forman la capa de corrosión. Tanto n como c_0 son considerados constantes y sus valores se

calculan a partir de datos de calibración obtenidos en experimentos de exposición a largo y corto plazo, respectivamente (apartados siguientes). Por ejemplo, en la norma UNE-EN ISO 9224:2012 se indica un valor $n = 0,523$ para el acero al carbono y se establece un valor máximo para n de 0,575, para un nivel de confianza del 95 %, debido a la incertidumbre asociada a la medición experimental.

Cabe señalar que esta relación funcional de tipo potencial implica que la velocidad, o progreso de la corrosión a cualquier tiempo, está relacionada con el valor inicial, por eso al valor c_0 se le denomina **velocidad de corrosión**. Por otra parte, el valor del exponente n está relacionado con la capacidad protectora de la capa de corrosión. Otro aspecto interesante de esta función, que tiene que ver con el valor de n , es que este último es indicativo de la desviación de la curva experimental con respecto a una situación ideal dada por una función parabólica perfecta. Valores de n próximos a 0,5 ajustan muy bien con la relación parabólica y se corresponden con ambientes poco contaminados. Aquí, el avance de la corrosión está gobernado por el proceso de difusión del oxígeno a través de la creciente capa de corrosión. Valores de n superiores a 0,5 indican una corrosión más acelerada, gobernada por procesos de erosión. Esta situación se da en ambientes marinos. Los valores de n inferiores a 0,5 se dan en situaciones en las que tiene lugar la compactación de la capa de corrosión por procesos de recristalización, lo cual ralentiza la corrosión (Vidal *et al.*, 2019). La tabla 7.1 lista los valores de velocidad de corrosión de acero, zinc y cobre para cada una de las categorías del nivel de corrosividad establecidas en la norma EN ISO 9223:2012.

Tabla 7.1. Valores de corrosividad para diferentes metales preparados y expuestos de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 8565:2012. Adaptado de UNE-EN ISO 9223:2012.

Categoría	Corrosividad ($\mu\text{g m}^{-2}$)		
	Acero	Zinc	Cobre
C1	<1,3	<0,1	<0,1
C2	1,3-25	0,1-0,7	0,1-0,6
C3	25-50	0,7-2,1	1,3-2,8
C4	50-80	2,1-4,2	1,3-2,8
C5	80-200	4,2-8,4	2,8-5,6
CX	200-700	8,4-25	5,6-10

De acuerdo con el modelo potencial, los aceros inoxidables exhiben comportamientos corrosivos caracterizados por valores muy bajos de n ($n < 0,4$), el acero al carbono y el cobre son, también, metales bastante estables con valores de n comprendidos entre 0,5-0,65 mientras que el aluminio y el zinc presentan los peores resultados con valores de $n > 0,8$.

7.2.3. Modelo lineal general o bilogarítmico

En exposiciones prolongadas de metales se ha observado que el proceso de corrosión transcurre en dos etapas denominadas **fase de iniciación** y **fase de progresión** o propagación. En estas fases la velocidad de corrosión experimenta un crecimiento lineal con el logaritmo del tiempo de exposición:

$$\log c = n_1 \log t \quad t \leq t_1 \quad (7.3)$$

$$\log c = n_1 \log t_1 + n_2 \log t/t_1 \quad t > t_1 \quad (7.4)$$

Siendo c el valor de la variable representativa de la corrosión atmosférica, n_1 y n_2 los exponentes de la fase de iniciación y de progresión, respectivamente, y t_1 el tiempo al que finaliza la fase de iniciación. Los exponentes varían con el tipo de atmósfera mientras que t_1 lo hace con el tipo de metal.

Como se muestra en la figura 7.2, la representación gráfica del logaritmo de la corrosión frente al logaritmo del tiempo de exposición da como resultado una gráfica con dos tramos lineales que se corresponden con las fases inicial y de propagación.

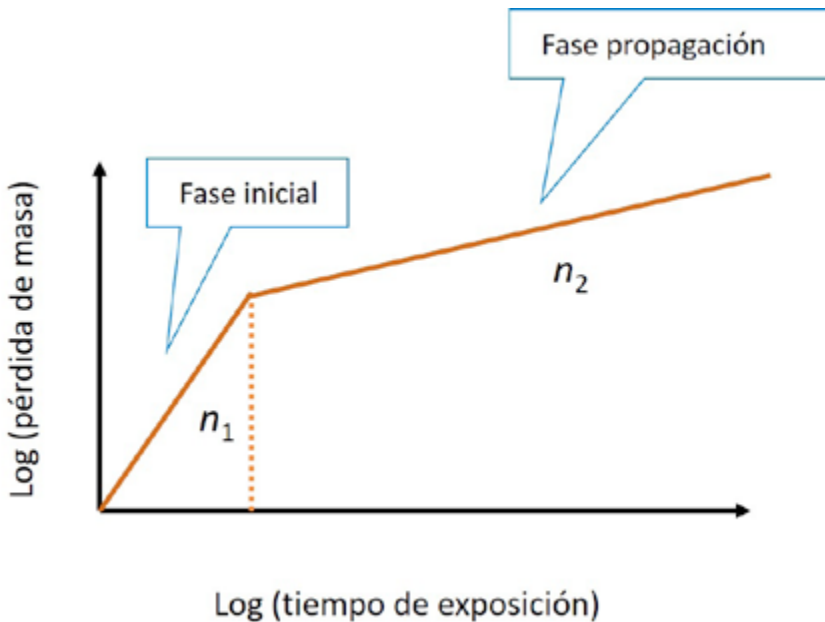


Figura 7.2. Logaritmo de la pérdida de masa de metal frente al logaritmo del tiempo de exposición de probetas metálicas a la atmósfera. Los valores n_1 y n_2 vienen dados por las pendientes de las rectas en ambas fases.

Fase de iniciación de la corrosión: en esta fase los agentes agresivos ingresan en el material que está directamente expuesto o se difunden a través de la capa de protección por poros y grietas. Ello inicia la formación de una capa superficial de productos de corrosión. En esta primera fase el proceso de corrosión está controlado por el mecanismo de difusión.

Fase de propagación: en esta fase, que sucede a la anterior, los agentes agresivos continúan atacando en profundidad al metal. Sin embargo, el avance se ralentiza debido a que la capa de corrosión formada actúa, a modo de barrera, dificultando el acceso a las partes más internas aun inalteradas. Es importante señalar que los mecanismos de corrosión electroquímica de metales expuestos a la atmósfera son muy complejos ya que la capa de corrosión formada no es uniforme. En efecto, se ha observado que los productos de corrosión formados varían en función del tipo de contaminante y su concentración e impiden, diferenciadamente, la difusión de agua, oxígeno y otros gases hacia el metal inalterado (figura 7.3). En esta segunda fase suelen tener lugar cambios apreciables en la morfología y las propiedades del material debido a la capa superficial de corrosión: cambio de color y apariencia, aparición de grietas, fisuras, poros, cráteres, delaminaciones, modificación de las propiedades mecánicas y eléctricas, ductilidad, pérdida de resistencia, etc. (Stewart y Bastidas-Arteaga, 2019).

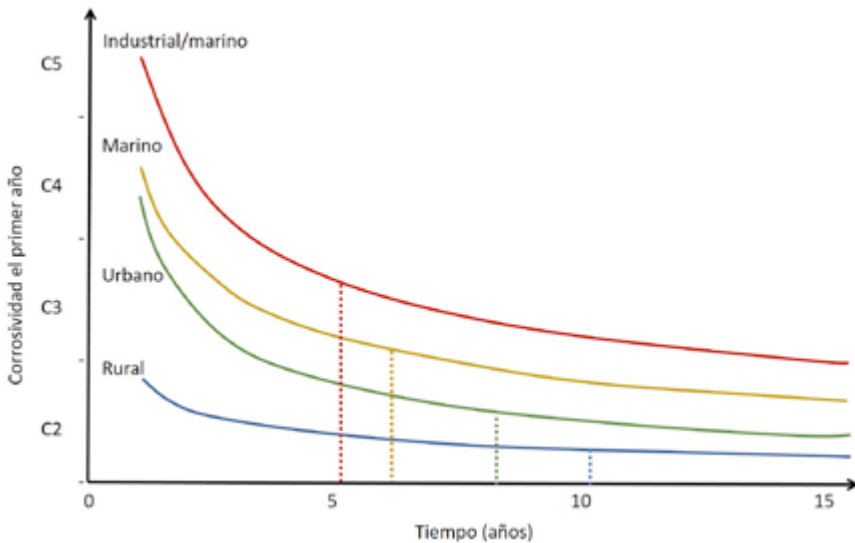


Figura 7.3. Curva de corrosividad del acero al carbono durante el primer año para las diferentes categorías de corrosividad establecidas en la norma UNE-EN ISO 9223:2012. Las líneas con trazo discontinuo indican el momento en el que se alcanza la estabilización. (Adaptado de Vidal *et al.*, 2019).

La norma internacional UNE-EN ISO 9224:2012 establece un modelo simple en dos fases, definidas mediante funciones lineales, para describir la corrosión de metales a largo plazo. Este modelo se basa en el uso de velocidades de corrosión promedio (Rizzo *et al.*, 2019). Durante los diez primeros años la corrosión viene dada por la ecuación:

$$d(t)_{10} = r_{\text{promedio}} \cdot t (t \leq 10 \text{ años}) \quad (7.5)$$

Donde $d(t)_{10}$ es el espesor de la capa de metal perdido (mm) en los 10 primeros años y r_{promedio} es la velocidad de corrosión promedio (mm año^{-1}). Tras diez años de exposición, se asume la constancia de la velocidad de corrosión con el tiempo y el espesor de la capa de

metal perdido viene dado por la siguiente expresión:

$$d(t)_i = r_{\text{promedio}} \cdot 10 + r_{\text{estacionario}} \cdot (t - 10) \cdot t (t \geq 10 \text{ años}) \tag{7.6}$$

Donde $d(t)_i$ es el espesor de la capa de metal perdido en el tiempo t y $r_{\text{estacionario}}$ es la velocidad de corrosión adquirida en el estado estacionario al cual se ha llegado cuando se alcanza la estabilización. La norma estándar EN ISO 9224:2012 proporciona los valores guía de r_{promedio} y $r_{\text{estacionario}}$ para diversos metales tales como hierro, acero, zinc, cobre y aluminio.

El proceso de corrosión puede complicarse, como se muestra en la figura 7.4, si intervienen agentes microbiológicos (Stewart y Bastidas-Arteaga, 2019).

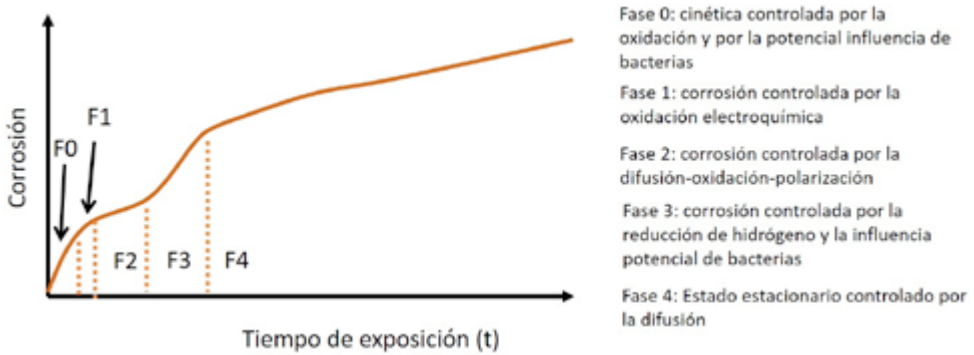


Figura 7.4. Gráfica corrosión versus tiempo de exposición con descripción de los procesos que controlan cada fase. Adaptado de Stewart y Bastidas-Arteaga (2019).

7.2.4. Modelo potencial numérico

Pese a la gran adecuación del modelo potencial o bilogarítmico, estudios posteriores a su publicación han demostrado que, en general, los valores experimentales muestran desviaciones del modelo tras 5 a 8 años de exposición, dependiendo del metal, debido a la estabilización de la capa de corrosión, lo que da lugar a una tercera fase, o a dos subfases dentro de la segunda, donde los valores de n , en la última, son considerablemente menores, disminuyendo de 0,9 a 0,3, y adquiriendo valores promedio comprendidos entre 0,6 a 0,1. En tales casos, el proceso de corrosión se ajusta mejor a un modelo potencial numérico que viene dado por la ecuación (7.7):

$$c = c_1 t_p^{n-m} t^m \quad (t \geq t_p) \tag{7.7}$$

Donde t_p es la duración en años de la exposición correspondiente a la pendiente n y m es la pendiente del segundo periodo hasta el tiempo t . Por otra parte, los valores de las constantes c_1 y n se calculan mediante métodos estadísticos de regresión a partir de valores experimentales y, más recientemente, mediante modelos matemáticos basados en redes neuronales artificiales (Vidal *et al.*, 2019).

7.2.5. Función dosis-respuesta

La **función dosis-respuesta** se define como la relación cuantitativa de dependencia entre un agente de deterioro específico y el efecto producido en el material integrante del bien cultural (Strlič *et al.*, 2013). El conocimiento de las funciones dosis-respuesta específicas para un determinado medioambiente es de interés por tres motivos principales:

- Determinar el modelo cinético de evolución del proceso corrosivo.
- Determinar los **niveles aceptables o umbrales** de exposición a un factor medioambiental en un determinado material vulnerable.
- Clasificar diferentes localizaciones o condiciones de exhibición en función de la mayor o menor capacidad para alterar el material en estudio.

Como se ha señalado previamente, la función dosis-respuesta puede determinarse empírica o experimentalmente. Los estudios de **dosimetría** están dirigidos a determinar experimentalmente la función dosis-respuesta. En objetos metálicos, especialmente si están conservados en ambientes exteriores, la corrosión electroquímica puede llegar a ser muy intensa en función de la combinación sinérgica de diversos agentes de deterioro tales como precipitaciones, temperatura, humedad, agentes contaminantes o insolación, entre otros. Se ha demostrado que su efecto sobre los objetos no es aditivo, por lo que los estudios de la relación de dependencia individual del deterioro con cada agente no resultan eficaces para reproducir el proceso real. Por este motivo, los ensayos de exposición de probetas a atmósferas agresivas, realizados en el laboratorio en condiciones controladas, no resultan eficaces en estudios de dosimetría. En estos casos, se recurre a estudios experimentales basados en campañas de exposición de probetas en el exterior. En este tipo de ensayos el metal en estudio es expuesto a diversos agentes de corrosión simultáneamente, lo que permite evaluar la corrosividad del lugar (figura 7.5). Como ejemplo, la tabla 7.2 muestra los valores de pérdida de masa y de espesor de la probeta al cabo de un año. Se observa que el acero ensayado es notablemente más vulnerable al deterioro por agentes medioambientales que el zinc y las aleaciones de cobre.

Este fenómeno se ilustra con claridad en la figura 7.6, que muestra las curvas de pérdida de masa con el tiempo obtenidas experimentalmente en probetas de tres metales, cobre, zinc y bronce, expuestas a la atmósfera (UNE-EN ISO 9223:2012). La forma de estas curvas demuestra que, a medida que transcurre el tiempo y la capa de corrosión se va engrosando, el avance de la corrosión experimenta una disminución.

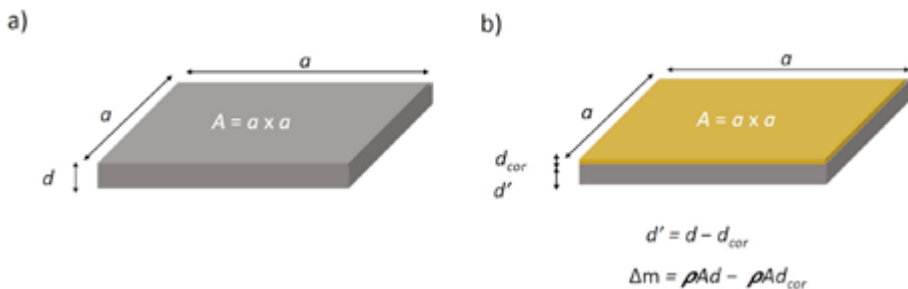


Figura 7.5 (a) Probeta cuadrada de metal de aristas a y espesor d sin corrosión; (b) probeta después de un período de exposición con una capa de corrosión de espesor d_{cor} . La probeta ha experimentado un adelgazamiento adquiriendo un espesor d' menor. La pérdida de masa de la probeta ha sido $\Delta m = \rho A d - \rho A d_{cor}$, donde m es la masa y ρ es la densidad del metal.

Tabla 7.2. Valores de pérdida de masa y de pérdida de espesor de la probeta de metal por formación de productos de corrosión al cabo de un año en ambientes con niveles bajos de contaminantes atmosféricos (Knotkova y Kreislova, 2007).

Metal/aleación	Pérdida masa	Pérdida de espesor
	(g m ⁻² año ⁻¹)	(μm año ⁻¹)
Acero	72,0	9,16
Zinc	3,3	0,46
Cobre	3,0	0,33
Bronce	2,1	0,23
Aluminio	0,09	0,03

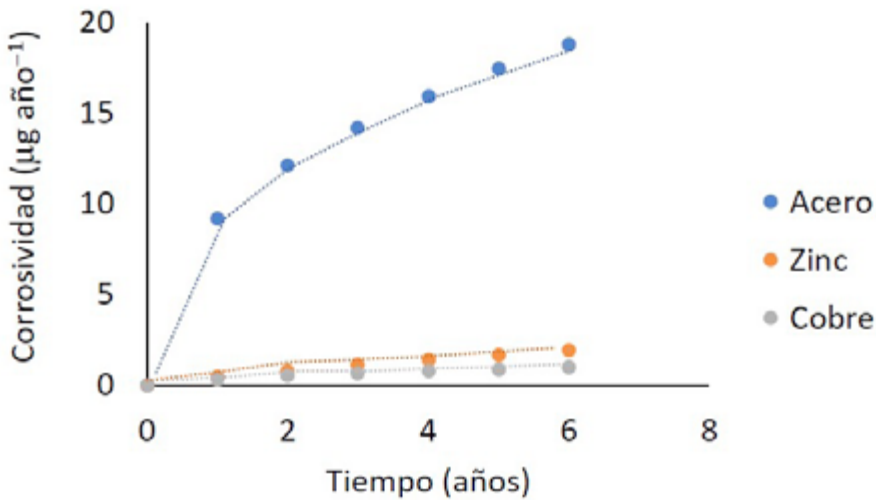


Figura 7.6. Gráficas experimentales de corrosividad versus tiempo de exposición para tres metales en una localización con categoría C3 (media). Datos disponibles en UNE-EN ISO 9223:2012.

La aplicación de tratamientos de estadística inferencial aplicada a los datos experimentales permite establecer un modelo matemático para describir el proceso cinético de corrosión que viene dado por una función igual a la mostrada previamente en la ecuación (7.1) correspondiente al modelo clásico potencial:

$$\left(\frac{\Delta m}{A}\right) = c_0 \cdot t^n \tag{7.10}$$

donde $\Delta m/A$ es la pérdida de masa por unidad de área, t es el tiempo de exposición, c_0 es la constante de corrosividad calculada, experimentalmente, a partir de la curva por regresión parabólica y n es el exponente que, en condiciones ideales, adopta el valor 0,5.

Sin embargo, la función dosis-respuesta no necesariamente tiene que ser expresada como una función del tiempo. Alternativamente, tal como se propone en la norma EN-

UNE ISO 9224:2012, la velocidad de corrosión de metales estándar se puede describir como una función de los diferentes factores medioambientales causantes de deterioro, mediante la expresión matemática:

$$r_{corr} = 1,77 \cdot P_d^{0,52} \cdot e^{0,020HR+f_{st.}} + 0,102 \cdot S_d^{0,62} \cdot e^{0,033HR+0,040T} \tag{7.11}$$

$$f_{st.} \begin{cases} 0,15 \cdot (T - 10) & \text{si } T \leq 10^\circ\text{C} \\ -0,054 \cdot (T - 10) & T > 10^\circ\text{C} \end{cases}$$

donde r_{corr} es la corrosión del metal (espesor perdido $\mu\text{m } \text{área}^{-1} \text{ año}^{-1}$), T es la temperatura media anual, HR es el valor promedio anual de la humedad relativa (%) y P_d y S_d son los valores de deposición media anual de SO_2 y cloruros, respectivamente.

Otros estudios han añadido agentes medioambientales de alteración con influencia en el proceso de corrosión en la función dosis-respuesta:

$$r_{corr} = 16,042 - 0,276T - 0,256RH + 6,243TOW + 0,007P + 1,521P_d + 0,962S_d \tag{7.12}$$

Donde, T es la temperatura media anual ($^\circ\text{C}$), HR , es la humedad relativa media anual (%), TOW , (por sus siglas en inglés) es el tiempo de humectación, definido como la tasa anual de tiempo (horas) con un valor elevado de HR ($>80\%$), P es la cantidad de precipitación anual (mm), P_d es la velocidad media anual de deposición de sulfatos ($\text{mg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y S_d es la velocidad media anual de deposición de cloruro ($\text{mg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) (Mariaca *et al.* 1999).

Este tipo de estudios experimentales ha llevado a elaborar una clasificación de los ambientes corrosivos atendiendo a la agresividad de los principales factores medioambientales actuando sinérgicamente. La tabla 7.3 muestra esta clasificación que aparece contemplada en la norma internacional UNE-EN ISO 9223:2012.

Tabla 7.3. Categorías de corrosividad establecidas en UNE-EN ISO 9223:2012, UNE-EN 12500:2000.

Categoría de corrosividad	Corrosividad (Espesor $\mu\text{m } \text{año}^{-1}$)		Nivel de contaminantes	Condiciones estándar	
				Exterior	Interior
C1	Muy baja	Acero < 1,3 Zinc < 0,1 Cobre < 0,1	-	Zonas secas o frías; contaminación y tiempos de humectación muy bajos. Desiertos, Antártida	Espacios caldeados con baja humedad y contaminación despreciable

C2	Baja corrosividad	Acero 1,3-25 Zinc 0,1-0,7 Cobre 0,1-0,6	Atmósfera con contaminación baja $SO_2 < 12 \mu g m^{-3}$	Pequeñas ciudades, áreas rurales	Espacios no caldeados, humedad y temperatura variable, baja frecuencia de condensación y contaminación
C3	Moderada corrosividad	Acero 25-50 Zinc 0,7-2,1 Cobre 0,6-1,3	Atmósfera con contaminación moderada (SO_2 : $12-40 \mu g m^{-3}$) y algún efecto de cloruros	Áreas urbanas, áreas costeras con baja deposición de cloruros	Espacios con contaminación y frecuencia de condensación moderada causadas por la producción industrial
C4	Alta corrosividad	Acero 50-80 Zinc 2,1-4,2 Cobre 1,3-2,8	Atmósfera con contaminación alta SO_2 : $40-80 \mu g m^{-3}$ o efecto importante de cloruros	Áreas urbanas contaminadas, áreas industriales, áreas costeras sin spray de agua salada	Espacios con frecuencia de condensación y contaminación elevada causadas por producción industrial
C5	Muy alta corrosividad	Acero 80-200 Zinc 4,2-8,4 Cobre 2,8-5,6	Atmósfera con contaminación alta SO_2 : $80-250 \mu g m^{-3}$ o efecto importante de cloruros		Espacios casi permanente condensación y contaminación elevada causada por producción industrial
CX	Extrema	Acero 200-700 Zinc 8,4-25 Cobre 5,6-10	Atmósfera con contaminación alta SO_2 : $>250 \mu g m^{-3}$ o efecto importante de cloruros		

7.3. Modelos específicos para los agentes climáticos y la contaminación

El proceso de corrosión atmosférica es un fenómeno complejo en el que se combinan diferentes efectos parciales resultantes de la influencia de una serie de agentes climáticos y medioambientales. Entre aquellos con mayor influencia cabe señalar la temperatura, la humedad y las precipitaciones acuosas, la salinidad, los contaminantes atmosféricos y los microorganismos.

7.3.1. Humedad y precipitaciones acuosas

Por tratarse de un proceso electroquímico, la corrosión de metales requiere la presencia de un líquido que actúe como electrolito. En la práctica, se trata de una película

de humedad de centenares de micrómetros que puede adelgazarse hasta unas pocas monocapas de moléculas de agua que contienen algunos iones. Esta situación se da cuando se registran precipitaciones acuosas (lluvia, nieve, niebla o granizo) o bien cuando la humedad se condensa debido a cambios de temperatura (rocío). Se ha estimado que, para que la corrosión metálica sea significativa, es necesario que la humedad relativa (HR) supere el 60-80 %, dependiendo del metal. Estas condiciones definen el **tiempo de humectación** (TOW, por sus siglas en inglés) que viene expresado en número de horas (días) al año con un valor de HR > 80 % y temperatura > 0 °C o, alternativamente, en número de días al año que registran precipitaciones superiores a 0,2 mm (Rivero *et al.*, 2007). La solubilización de contaminantes atmosféricos en la película acuosa favorece la corrosión al incrementar la fuerza iónica del electrolito. También la combinación de temperatura y HR elevada favorece la corrosión. Por su parte, la HR elevada favorece la formación de aerosoles que, en las zonas marinas, producen un incremento de las deposiciones salinas. Además, se ha comprobado que la salinidad contribuye muy notablemente a la corrosión metálica cuando la humedad atmosférica supera el 80 % de HR. Esto justifica por qué se ha adoptado ese valor de HR para definir el TOW. Por contra, las precipitaciones intensas tienen un efecto beneficioso de lavado de las superficies y la concurrente eliminación de los contaminantes atmosféricos, sin embargo, es necesaria una mínima intensidad de la precipitación para que el lavado sea efectivo.

En la norma EN-UNE ISO 9223:2012, se establecen diferentes categorías de corrosión en función del TOW local tal como muestra la tabla 7.4

Tabla 7.4. Categorías de corrosividad relativas al TOW.

Categoría	TOW
T ₁	TOW < 10
T ₂	10 < TOW < 250
T ₃	250 < TOW < 2,500
T ₄	2.500 < TOW < 5,500
T ₅	5.500 < TOW

A partir de datos experimentales se han realizado estimaciones de la relación cuantitativa entre el TOW, y el número de días al año con precipitaciones superiores a un cierto valor (Benarie y Lipfert, 1986):

$$t_{\text{TOW}} = 1,686 \cdot 10^{-3} + 3,66 \cdot 10^{-3} \cdot D \approx 3,66 \cdot 10^{-3} \cdot D \quad (7.13)$$

Donde, D es el número de días al año con precipitaciones superiores a 0,2 mm y t_{TOW} es el TOW. Paralelamente, Nguyen *et al.* (2011) han hecho una estimación para el territorio de Australia de la relación entre el número de días D con precipitaciones superiores a 0,2 mm y el TOW, a partir de datos experimentales:

$$t_{\text{TOW}} = 0,22D \quad (7.14)$$

Los estudios realizados por Benarie y Lipfert (1986) y Nguyen *et al.* (2011) demuestran que, con independencia de la localización geográfica, el TOW y, por ende, la velocidad de corrosión, c_o , tienen una relación de proporcionalidad directa con la tasa anual de días con precipitación superior a un determinado valor (por ejemplo, 0,2 mm en Australia):

$$t_{oTOW} = KxD \quad (7.15)$$

Siendo c_{oTOW} la contribución del TOW a la velocidad de corrosión y K la constante de proporcionalidad entre el c_{oTOW} y la tasa anual de días con precipitación superior al umbral de corrosión. El valor de esta constante depende de la ubicación geográfica y debe ser calculado experimentalmente.

7.3.2. Temperatura del aire

La temperatura es uno de los principales marcadores medioambientales del cambio climático por el efecto directo que el incremento de la proporción de gases de efecto invernadero en el aire tiene en el calentamiento global. La temperatura del aire, además, influye directa e indirectamente en los procesos de corrosión. En general, este agente meteorológico-climático determina, con su incremento, un aumento concomitante en la velocidad de avance del proceso de corrosión. Esta dependencia viene cuantificada por la ecuación de Arrhenius:

$$C_o = \alpha e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (7.16)$$

Donde c_o es el parámetro de velocidad de corrosión definido en la ecuación (7.1), α es el factor de frecuencia, T es la temperatura en K, E_a es la energía de activación y R es la constante de Boltzman para gases ($8,31 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$). Siguiendo este modelo, se han efectuado estimaciones que sugieren que, con valores elevados de HR, la velocidad de corrosión puede llegar a duplicarse con cada 10°C de incremento de la temperatura dentro de los intervalos normales de $20\text{-}30^\circ\text{C}$. El incremento de la velocidad tiene lugar en la mayoría los procesos físicos y químicos involucrados en la corrosión metálica, si bien, en algunos de ellos, el efecto del incremento de la velocidad actúa dificultando la corrosión. Ejemplo de ello sería la desorción de la película acuosa formada en la superficie del metal.

Cole y Patterson (2010) han propuesto un modelo sencillo que correlaciona la velocidad de corrosión con el incremento de temperatura:

$$C_{oTfinal} = C_{oTinitial} e^{260[(1/Tinitial)-(1/Tfinal)]} \quad (7.17)$$

Siendo $c_{oTinitial}$ y $c_{oTfinal}$ las velocidades de corrosión al inicio y al final del proceso de cambio de temperaturas $T_{initial}$ y T_{final} . Este modelo se basa en observaciones experimentales que demuestran que un aumento de temperatura de 2 K incrementa la velocidad de corrosión en un 0,6 %.

La influencia de la temperatura en los procesos de corrosión se complica si se considera su variación cíclica diaria en combinación con la HR. Por la noche la temperatura baja y la

HR aumenta generando una lámina de agua en la superficie del metal. Con el incremento de temperatura al amanecer se produce una reducción de la HR que evapora la lámina de agua superficial formada por la noche y la corrosión se ralentiza e incluso se detiene. Ello hace modular notablemente la importancia del efecto antes descrito de la temperatura sobre la corrosión. Por otra parte, los contaminantes gaseosos disueltos en la película de humedad hacen que el punto de congelación descienda por debajo de 0 °C, de tal modo que es posible la corrosión incluso a -5 °C.

7.3.3. Salinidad

Los aerosoles, principalmente los cloruros, al solubilizarse en la película de agua superficial dan lugar a productos de corrosión solubles que incrementan la fuerza iónica y, por consiguiente, la conductividad del electrólito sobre el metal, lo cual favorece su corrosión y contribuye a desestabilizar los compuestos de pasivado aplicados en su superficie. Para determinar el efecto de los aerosoles en los procesos de corrosión se ha definido una magnitud física denominada salinidad aerotransportada. La **salinidad aerotransportada** (S) se determina experimentalmente mediante el método de la candela húmeda (UNE-EN ISO 9225:2012). Un método alternativo consiste en determinar empíricamente la salinidad a partir de medidas experimentales de materia particulada y utilizando el sodio o el cloruro como trazador (Consellería de Medio Ambiente e Ordenación do Territorio- Xunta de Galicia (2015) (capítulo 6).

El efecto de la salinidad en la velocidad de corrosión puede calcularse a partir de S mediante la expresión propuesta por Cole y Corrigan (2009):

$$C_{oS} = \eta \cdot S \cdot U \cdot A \quad (7.18)$$

Donde c_{oS} es la contribución de la salinidad a la velocidad de corrosión c_o , se denomina factor de eficiencia de la deposición de aerosol, U es la velocidad media anual del viento medida a nivel de la superficie terrestre (2-10 m) y A es el área de la superficie de la candela en la que impacta el aerosol.

Las dos causas principales de formación de aerosoles ricos en cloruros en la atmósfera son los mares y océanos y la actividad industrial. La salinidad atmosférica marina varía dependiendo del régimen de agitación del mar, a saber, aguas agitadas o en calma que, a su vez, depende del régimen de vientos (dirección y velocidad).

Los primeros modelos que correlacionaban la formación de aerosoles con la velocidad del viento eran de tipo lineal. Sin embargo, estudios posteriores han demostrado que los resultados experimentales ajustan mejor a modelos exponenciales o potenciales (Rivero *et al.*, 2007). Un modelo cuantitativo exponencial de producción de aerosol marino por la acción del viento contra la costa, ampliamente aceptado, es el propuesto por McKay *et al.* (1994):

$$\ln S_{aire} = 0,23U + 3,05 \quad (7.19)$$

Donde S_{aire} es la concentración de sal en el aire ($\mu\text{g m}^{-3}$) y U es la velocidad del viento (m s^{-1}) a 2 m sobre el nivel del mar.

Otros factores que también determinan el contenido atmosférico en aerosoles son la distancia a la costa, la topografía de la zona, la morfología de las olas, la temperatura del agua de mar, las corrientes, etc. (Rivero *et al.*, 2007; Cole *et al.*, 2004).

Cuando se considera el contenido atmosférico de aerosol, la distancia a la costa es un factor muy importante a tener en cuenta ya que la trayectoria del aerosol está determinada tanto por la velocidad del viento como por la masa de la partícula o gotícula (partículas sedimentables y flotantes). A mayor masa (partículas sedimentables), más rápidamente se producirá la sedimentación por acción gravitatoria. Con el aumento de la velocidad del viento se incrementa la probabilidad de deposición por impacto o fricción con el terreno de la masa de aire. La deposición gravitatoria tiene lugar mediante dos mecanismos, la deposición húmeda y la deposición seca. Se han elaborado modelos que relacionan la concentración de aerosol con la distancia a la costa que, en general, muestran que esta magnitud disminuye de manera asintótica al valor de fondo de aerosoles en el aire, a medida que aumenta la distancia a la costa. Basándose en estos dos mecanismos, Feliu *et al.* (1999) han propuesto un modelo exponencial de dependencia de la velocidad de corrosión con la distancia tierra adentro desde la línea de la costa (ecuación 7.20):

$$c = c_0 \exp(-Bx) + A \quad (7.20)$$

Donde B es una constante, A es la velocidad de corrosión a salinidad cero, c es la velocidad de corrosión a una distancia x tierra adentro y c_0 es una constante cuyo valor coincide prácticamente con la velocidad de corrosión en la línea de costa si esta última cumple la condición $c_0 \gg A$. Ahora bien, según indican Rivero *et al.* (2007), los datos experimentales no permiten distinguir entre la expresión (7.20) y esta otra que asume un valor muy bajo para A ($A \approx 0$).

$$c = c_0 \exp(-Bx) \quad (7.21)$$

La ecuación (7.21) es similar a la obtenida para la dependencia de la concentración de aerosol o salinidad aerotransportada con la distancia a la costa:

$$S = S_0 \exp(-ax) \quad (7.22)$$

Siendo S_0 la salinidad aerotransportada en la línea de costa y a una constante asociada al decaimiento de la concentración de aerosol en aire. Cole *et al.*, (2004) han elaborado sendos modelos para la salinidad aerotransportada producida en la rompiente de las olas con la costa y la producida en el océano a media y larga distancia. Según estos, la salinidad aerotransportada producida en la rompiente es función del viento, principalmente, y decrece rápidamente al alejarse de la línea de la costa, mientras la salinidad aerotransportada producida en el océano depende de la climatología y condiciones meteorológicas de la región y puede desplazar las partículas de aerosol a muchos km tierra adentro. Los modelos propuestos por estos autores han sido obtenidos combinando el Sistema de Información

Geográfica (GIS) y modelizaciones informáticas de dinámica de fluidos (MDF) y vienen expresados matemáticamente por:

- *Aerosoles formados en el océano para localizaciones tierra a dentro a distancias de rango medio (RM) (aprox. 50 km):*

$$S_{\text{océano RM}} = S_0 \exp(-x/a) \quad (7.23)$$

Siendo $S_{\text{océano RM}}$ la salinidad aerotransportada, producida por el océano, en un lugar tierra adentro a una distancia de rango medio x de la costa, S_0 la salinidad aerotransportada en la línea de costa y a una constante asociada al decaimiento de la concentración de aerosol en aire con la distancia. Basándose en datos obtenidos mediante GIS y MDF, Cole *at al.*, (2004) estiman un valor para la constante $a = 50$. Utilizando el valor propuesto por estos autores para el factor de disminución del transporte de aerosoles y un valor arbitrario de 2 para la salinidad aerotransportada en la línea de costa, se obtiene la siguiente gráfica de disminución de la salinidad aerotransportada con la distancia de rango medio a la costa (figura 7.7):

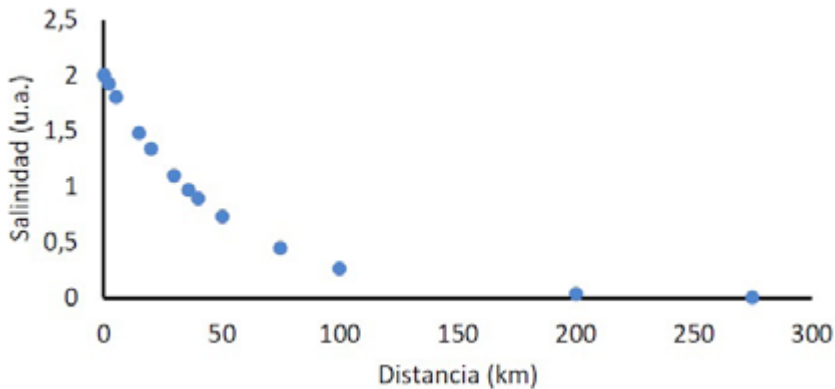


Figura 7.7. Gráfico salinidad aerotransportada asociada a aerosoles formados en el océano versus distancia de rango medio a la línea de costa.

Se observa que el valor de la salinidad aerotransportada disminuye hasta un 0,5 % del valor en la línea de costa, tras haber recorrido 275 km.

- *Aerosoles formados en el océano para localizaciones tierra a dentro a distancias de rango alto (RA) (aprox. 500 km):*

$$S_{\text{océano RA}} = S_0 [1 - (5 \cdot 10^{-4} \cdot x)] \quad (7.24)$$

Siendo $S_{\text{océano RA}}$ la salinidad aerotransportada, producida en el océano, en un lugar a una distancia tierra adentro de rango alto x de la costa y S_0 la salinidad aerotransportada en la línea de costa. La figura 7.8 muestra la gráfica que se obtiene para localizaciones alejadas de la línea de costa distancias entre 25 y 2000 km:

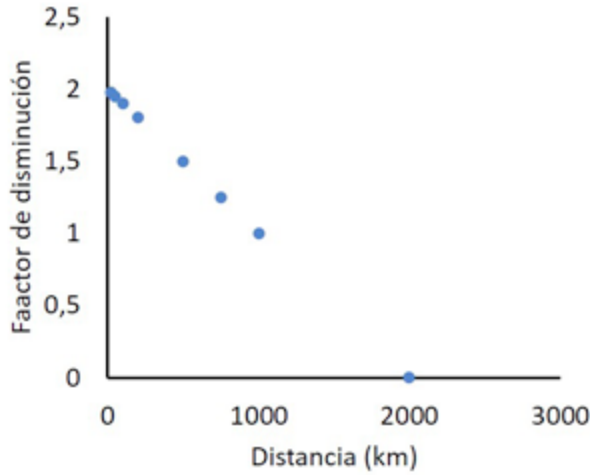


Figura 7.8. Gráfico mostrando la variación de la salinidad en aire RA asociada a aerosoles formados en el océano versus la distancia tierra adentro a la línea de costa.

Se observa que el valor de la salinidad aerotransportada disminuye hasta un 0,1 % del valor en la línea de costa, tras haber recorrido 2000 km.

- *Aerosoles formados en la rompiente para localizaciones tierra a dentro:*

$$S_{\text{rompiente}} = S_0 [0,9\exp(-x/0,1)+(0,1e^{-x})] \tag{7.25}$$

Donde $S_{\text{rompiente}}$ es la salinidad aerotransportada producida en la rompiente, calculada para una localización situada a una distancia tierra adentro x de la costa y S_0 la salinidad aerotransportada en la línea de costa.

La figura 7.9 muestra la gráfica que se obtiene para localizaciones alejadas de la línea de costa distancias entre 0 y 1 km:

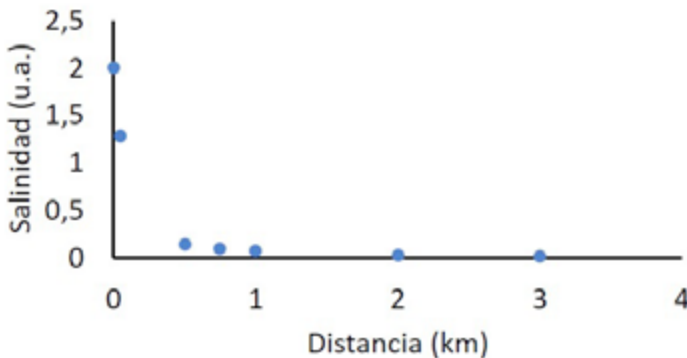


Figura 7.9. Gráfico mostrando la variación de la salinidad aerotransportada asociada a aerosoles formados en la rompiente versus la distancia tierra adentro a la línea de costa.

Se observa que a 700 m la salinidad aerotransportada disminuye hasta el 0,5 % de la salinidad aerotransportada en la línea de costa.

Por tanto, la salinidad aerotransportada en un punto tierra adentro alejado una distancia x de la línea de la costa tendrá una contribución c_{os} a la velocidad de corrosión asociada al efecto de los aerosoles marinos que será el producto de los tres mecanismos descritos que actúan simultáneamente. Combinando las ecuaciones (7.23), (7.24) y (7.25) se obtiene:

$$C_{os} = S_{rompiente} \times S_{océano RA} \times S_{océano RM} \quad (7.26)$$

$$= S_o [0,9 \exp(-x/0,1) + (0,1 e^{-x})] \times S_o [1 - (5 \cdot 10^{-4}) \cdot x] \times S_o \exp(-x/a)$$

7.3.4. Contaminantes atmosféricos

El contenido en agentes contaminantes en el aire depende considerablemente de las emisiones industriales, por ello es muy difícil proyectar su evolución futura, y de ahí la elaboración de los diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por el Panel Internacional para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y la evolución progresiva de estos escenarios con las seis evaluaciones periódicas elaboradas por este comité internacional. En general, los contaminantes atmosféricos contribuyen a la corrosión cuando se solubilizan en la película acuosa depositada en la superficie del metal, pues rebajan el pH incrementando, así, la acidez y promoviendo el proceso electroquímico que se ve favorecido en este rango bajo de la escala pH.

Particular atención debe ser prestada al efecto del dióxido de carbono, cuyo incremento es una de las principales causas responsables del calentamiento global del planeta. Cabe señalar que el efecto de este gas en la corrosión metálica no está completamente elucidado. Así, por ejemplo, diversos estudios realizados en algunos metales, como el zinc, parecen sugerir que el dióxido de carbono ejerce un efecto protector Nguyen *et al.* (2011).

Nguyen *et al.* (2011) establecen una dependencia de la velocidad de corrosión c_o con la concentración de contaminantes atmosféricos según la expresión:

$$C_{op} = 0,1 t_{TOW}^{0,5} P_{aire} \quad (7.27)$$

Donde c_{op} es la contribución a la velocidad de corrosión c_o debida a la influencia ejercida por los contaminantes atmosféricos, t_{TOW} es el TOW y P_{aire} es la concentración en aire de contaminantes atmosféricos expresada como concentración de SO_2 en $\mu g m^{-3}$. En opinión de Nguyen *et al.* (2011), el término relativo a la contaminación atmosférica contribuye de forma escasa a la velocidad de corrosión en ambientes marinos y rurales. En ambientes urbanos e industrializados su influencia es considerada muy localizada ya que se ha demostrado que la concentración de contaminantes tiene una relación de proporcionalidad inversa con la distancia a la fuente de emisión.

7.4. Modelo de dependencia de la velocidad de corrosión con los agentes medioambientales

Nguyen *et al.* (2013) han propuesto un modelo integrado que correlaciona matemáticamente la velocidad de corrosión c_o con variables representativas de los cuatro agentes de influencia descritos en los apartados anteriores. El modelo es muy simple ya que, en una misma ecuación matemática, se combinan las contribuciones a la velocidad de corrosión de cada uno de los cuatro agentes medioambientales (c_{oTOW} , c_{oS} , c_{oT} y c_{oP}), tal como se muestra en la tabla 7.5.

Tabla 7.5. Contribución de los diferentes agentes medioambientales a la velocidad de corrosión.

Agente medioambiental	Contribución a c_o	Relación de dependencia
Indicador		
Humedad y precipitaciones	c_{oTOW}	KxD , ecuación (7.15)
<i>D</i> : tasa anual de precipitación		
Temperatura	c_{oT}	, ecuación (7.17)
Salinidad	c_{oS}	, ecuación (7.26)
<i>S</i> : salinidades aerotransportadas		
$S_{rompiente}$, $S_{océanoRM}$, $S_{océanoRA}$		
Contaminantes atmosféricos	c_{oP}	, ecuación (7.27)
P_{aire} : concentración en aire de SO_2		

Nguyen *et al.* (2013) proponen la siguiente expresión para la velocidad de corrosión en función de las contribuciones correspondientes a cada uno de los agentes medioambientales:

$$C_o = (C_{oT} X c_{oTOW}^a X c_{oT}^b) + C_{oP} \tag{7.28}$$

Se observa que, en la expresión (7.28), las contribuciones de salinidad y humedad-precipitaciones están elevadas a exponentes *a* y *b* que adoptan valores constantes dependiendo del tipo de metal (tabla 7.6).

Tabla 7.6. Valores de a y b en la ecuación (7.27) (Nguyen *et al.*, 2013).

Metal	a	b
Zinc	0,6	0,5
Acero	0,8	0,5

También se comprueba que la dependencia de la velocidad de corrosión c_o con la concentración de contaminantes atmosféricos viene dada como un término añadido en el segundo miembro de la ecuación que describe el efecto combinado de temperatura, precipitaciones-humedad y salinidad sobre la velocidad de corrosión. En opinión de estos autores, el término c_{op} relativo a la contaminación atmosférica contribuye de forma escasa a la velocidad de corrosión en ambientes marinos y rurales. En ambientes urbanos e industrializados su influencia es considerada muy localizada ya que se ha demostrado que la concentración de contaminantes tiene una relación de proporcionalidad inversa con la distancia a la fuente de emisión. Por lo que, salvo en casos muy específicos, la influencia de estos agentes puede despreciarse.

7.5. Modelos de corrosión y cambio climático

Los estudios realizados hasta el momento acerca de la influencia del cambio climático en los procesos de corrosión de metales y, específicamente, en aceros y aleaciones de hierro, han seguido una metodología consistente en calcular valores futuros de variación del espesor de la probeta a partir de los modelos existentes de la función dosis-respuesta como la descrita por las ecuaciones (7.11) y (7.12) (Vidal *et al.*, 2019, Ngene *et al.*, 2015). Este método requiere conocer los valores proyectados de deposición de SO_2 y cloruros, los cuales se pueden estimarse basándose en la futura evolución de las emisiones de GEI que pronostican los escenarios establecidos por el IPCC (AR5 y AR6) (Intergovernmental Panel on Climate Change (2013, 2023a y 2023b).

Nguyen *et al.* (2013), en una línea teórica diferente, han desarrollado un modelo alternativo para estudiar el efecto del cambio climático en los procesos de corrosión metálica. Este método se basa en el cálculo de velocidades de corrosión r_{corr} ($= c_o$) mediante el uso de modelos parciales de influencia de los distintos agentes meteorológico-climáticos, ya descritos en los apartados precedentes. Estos modelos se combinan finalmente en una ecuación de dependencia única y, sobre esta, aplican los valores de parámetros meteorológico-climáticos derivados de las proyecciones climáticas elaboradas a partir de modelos regionalizados en los escenarios propuestos por el IPCC. Con este método obtienen valores de cambio (incremento) de la velocidad de corrosión en el futuro con respecto a un año de referencia en el presente o en el pasado. Esta metodología, al calcular valores relativos, puede ser adaptada a cualquier localización geográfica para la que se disponga de datos proporcionados por proyecciones regionalizadas. Por este motivo, en la presente investigación se ha optado por adaptar este modelo a las características de la Comunitat Valenciana en lugar de utilizar el modelo basado en el cálculo de velocidades absolutas a partir de la función dosis-respuesta (figura 7.10). El desarrollo matemático completo del modelo se describe en el capítulo 10.



Figura 7.10. Marco metodológico utilizado para desarrollar modelos de corrosión adaptados a los efectos del cambio climático.

7.6. Referencias

Benarie, M. y Lipfert, F.L. (1986) "A general corrosion function in terms of atmospheric pollutant concentration and rain pH", *Atmospheric Environment*, 20(10), pp. 1947-1958.

Cole, I. y Corrigan, P. (2009) "Service life prediction of materials". En: P. Newton *et al.*, Eds. *Technology, design and process innovation in the built environment*. New York: Taylor & Francis, pp. 72–96.

Cole, I.S., Chan, W.Y., Trinidad, G.S. y Paterson, D.A. (2004) "Holistic model for atmospheric corrosion Part 4 – Geographic information system for predicting airborne salinity. Corrosion", *Engineering, Science and Technology*, 39, pp. 89-96.

Cole, I.S. y Paterson D.A. (2010) "Possible effects of climate change on atmospheric corrosion in Australia", *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 45(1), pp. 19–26.

Consellería de Medio Ambiente e Ordenación do Territorio- Xunta de Galicia (2015) *PM10 y PM2,5 en ES1219: Área Metropolitana de A Coruña en 2015 y la influencia del aerosol marino Superaciones del VLD en la estación 15030027 – Torre de Hércules (A Coruña)*. Xunta de Galicia. Disponible en: https://www.meteogalicia.gal/datosred/infoweb/caire/informes/ESTUDIO/GL/ Informe_Aerosol_Marino_Coruna_2015.pdf. [Consultado el 18-05-2023].

Feliu, S., Morcillo, M., Chico, B. (1999) "Effect of distance from sea on atmospheric corrosion rate", *Corrosion*, 55, pp. 883-891.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) "AR5". En: Solomon, S., Qin, Manning, D.M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. y Miller, H. L. Eds. *Climate change 2007: The physical science basis* New York: Cambridge University Press, 996 pp.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2023a) AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023.

Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. [Consultado 5-05-2023].

Intergovernmental Panel on Climate Change (2023b) AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf. [Consultado 6-05-2023].

Knotkova, D. y Kreislova, K. (2007) "Corrosivity of atmospheres-derivation and use of information", *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*, 28, pp. 73-105.

Mariaca, L. y Morcillo, M., (1999) "Funciones de Daño (Dosis/Respuesta) de la Corrosión Atmosférica en Iberoamérica". En: Morcillo, M., Almeida, E., Rosales, B. Uruchurtu, J., Marrocos, M. Eds. *Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica: Parte I-Mapas de Iberoamérica de corrosividad atmosférica (Proyecto MICAT)*. Madrid: Gráficas Salué, S.A., pp. 629-660.

McKay, W.A., Garland, J.A., Livesley, D., Halliwell, C.M. y Walker, M.I. (1994) "The characteristics of the shore-line sea spray aerosol and the landward transfer of radionuclides discharged to coastal sea water", *Atmospheric Environment*, 28(20), pp. 3299-3309.

Ngene, B.U., Ede, A.N., Kumar, P. y Imam, B. (2015) "Effect of Climate Change Pollutants on the Corrosion Rate of Steel in Rural, Urban and Industrial Environments", *Journal of Environment and Earth Science*, 5, pp. 16.

Nguyen, M.N., Leicester, R.H. Wang, X. y Foliente, G.C. (2011) "Corrosion effects in the structural design of metal fasteners in timber constructions", *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(3), pp. 276-285.

Nguyen, M.N., Wang, X. y Leicester, R.H. (2013) "An Assessment of Climate Change Effects on Atmospheric Corrosion Rates of Steel Structures", *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 48(5), pp. 359-369.

Rivero, S., Chico, B. de la Fuente y D. Morcillo, M. (2007) "Corrosión atmosférica del acero bajo en carbono en un ambiente marino polar. Estudio del efecto del régimen de vientos", *Revista de metalurgia*, 43(5), pp.370-383.

Rizzo, F., Di Lorenzo, G., Formisano, A. y Landolfo, R. (2019) "Time-Dependent Corrosion Wastage Model for Wrought Iron Structures", *Journal of materials Civil Engineering*, 31, pp. 04019165.

Stewart, M.G. y Bastidas-Arteaga, E. (2019) *Climate Adaptation Engineering. Risks and Economics for Infrastructure Decision-Making*. Elsevier.

Strlič, M., Thickett, D., Taylor, J. y Cassar, M. (2013) "Damage functions in heritage science", *Studies in Conservation*, 58, pp.80-87.

UNE-EN ISO 9223:2012 Corrosión de metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Clasificación, determinación y estimación. UNE Asociación Española de Normalización. Disponible en: <http://une.org>. [Consultado 6-05-2023].

UNE-EN ISO 9224:2012. Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Valores de referencia para las categorías de corrosividad. UNE Asociación Española de Normalización. Disponible en: <http://une.org>. [Consultado 6-05-2023].

UNE-EN ISO 9225:2012 Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Medida de los parámetros ambientales que afectan a la corrosividad de las

atmósferas. UNE Asociación Española de Normalización. Disponible en: <http://une.org>. [Consultado 6-05-2023].

UNE-EN 12500:2000 Protección de los materiales metálicos contra la corrosión. Riesgo de corrosión en ambiente atmosférico. Clasificación, determinación y estimación de la corrosividad de los ambientes atmosféricos. Disponible en: <http://une.org>. [Consultado 6-05-2023].

Vidal, F., Vicente, R. y Mendes Silva, J. (2019) "Review of environmental and air pollution impacts on built heritage: 10 questions on corrosion and soiling effects for urban intervention", *Journal of Cultural Heritage*, 37, pp. 273–295.

7.7. Bibliografía

Bartuli, C., Cigna, R. y Fumei, O. (1999) "Prediction of the durability for outdoor bronzes: estimation of the corrosivity of atmospheric environment of the Capitoline Hill in Rome", *Studies in Conservation*, 44, pp. 245-252.

Camuffo, D. (2013) *Conservation, restoration and maintenance of Indoor and Outdoor Monuments*. Elsevier.

Hamilton, R., Vladimir Kucera, V., Tidblad, J. y Watt, J. Eds. (2009) *The Effects of Air Pollution on Cultural Heritage*. Springer.

Sabbioni, C. (2008) "El Cambio Climático y las colecciones de los museos". En: *Dialogues for the New Century. Mesa redonda sobre la conservación del patrimonio cultural en un mundo cambiante*. IIC.

Sousa, M.L., Dimova, S., Athanasopoulou, A., Dyngeland, T. y Pinto, A. (2020) Expected implications of climate change on the corrosion of structures. Publications Office of the European Union. Disponible en: <https://publications.jrc.ac.europa.eu>. [Consultado 6-05-2023].

Varotsos, C., Tzanis, C., Cracknell, A. (2009) "The enhanced deterioration of the cultural heritage monuments due to air pollution". *Environmental Science and Pollution Research International*, 16(5), pp. 590-592.

Parte 3

Resultados obtenidos en el proyecto AICO2021/095

Capítulo 8: Tendencias del clima de la Comunitat Valenciana. Años 2021 y 2022

Contenidos

8.1. Metodología

- 8.1.1. Selección de localizaciones de captación de datos
- 8.1.2. Fuentes de suministro de datos climáticos y de calidad de aire
- 8.1.3. Descarga y procesado de datos
- 8.1.4. Análisis de datos

8.2. Alcoi

- 8.2.1. Meteorología
- 8.2.2. Calidad del aire
- 8.2.3. Implicaciones en la conservación de patrimonio ferroviario

8.3. Valencia

- 8.3.1. Meteorología
- 8.3.2. Calidad del aire
- 8.3.3. Implicaciones en la conservación de patrimonio ferroviario

8.4. Vilafranca del Cid

- 8.4.1. Meteorología
- 8.4.2. Calidad del aire
- 8.4.3. Implicaciones en la conservación de patrimonio ferroviario

8.5. Estudio comparativo de las tres localizaciones

8.6. Referencias

8.7. Bibliografía

Para comprender e interpretar correctamente el impacto que el cambio climático tendrá en el futuro en el patrimonio ferroviario de la Comunitat Valenciana es conveniente, en primer lugar, analizar lo que ha sucedido en el pasado y lo que está sucediendo en el momento presente. En este capítulo se analizan las características del clima en el periodo más reciente que ha comprendido los dos primeros años de desarrollo del proyecto: 2021 y 2022.

8.1. Metodología

8.1.1. Selección de localizaciones de captación de datos

Se ha inventariado y estudiado la evolución anual de los valores medios diarios de temperatura (T), humedad relativa (HR), precipitación, contaminantes atmosféricos (SO_2 , O_3 , NO_2) y partículas en suspensión de $2,5 \mu m$ y $10 \mu m$ ($PM_{2,5}$ y PM_{10} , respectivamente), durante los años de 2021 y 2022 en tres localidades distintas de la Comunitat Valenciana con diversas características geográficas y climatológicas: Valencia (clima regional A, provincia de Valencia), Alcoi (clima regional F-G, provincia de Alicante) y Vilafranca del Cid (clima E regional, provincia de Castellón) (figura 8.1).



Figura 8.1. Distribución de puntos de obtención de datos para el estudio de la tendencia estacional del clima de la Comunitat Valenciana. Junto a la población se indica la categoría de corrosividad según la norma UNE-EN ISO 9223:2012 que *a priori* se atribuye a cada población y por la cual se han seleccionado estas tres localidades.

La elección de estas tres localizaciones se ha realizado conforme a los siguientes criterios:

- *Elección de localizaciones distribuidas a lo largo de la Comunitat Valenciana.* Se han seleccionado tres lugares emplazados en las tres provincias que integran esta comunidad autónoma, de norte a sur, Castellón, Valencia y Alicante.
- *Elección de lugares con diferentes características de corrosividad de metales.* Vilafranca del Cid es una localidad del interior con características de pequeña población situada en un área rural donde es esperable que haya una baja corrosividad

metálica. La ciudad de Valencia, es una población representativa de un ambiente urbano y marino por su situación en la línea de la costa. Por otra parte, es donde se ubica la locomotora Mikado 141F 9225, utilizada en el proyecto-piloto de conservación preventiva elaborado en el proyecto I+D, de ahí el interés específico en esta localización. Por último, Alcoi es una población del interior, que se sitúa en una zona menos poblada pero con un tejido industrial importante que la convierte en referente de un ambiente industrial.

- *Elección de localizaciones con estaciones meteorológicas y de calidad del aire.* Para efectuar este estudio se han utilizado datos de dos diferentes bases de datos. Concretamente, los datos meteorológicos utilizados proceden de la base de datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), mientras que los datos de niveles de contaminantes atmosféricos proceden de la Red Valenciana de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica de la Generalitat Valenciana (RVVCCA-GVA). El hecho de que la distribución de estaciones medioambientales de AEMET y RVVCCA-GVA no sea coincidente, ha limitado notablemente las opciones.

8.1.2. Fuentes de suministro de datos climáticos y de calidad de aire

Las tablas 8.1 y 8.2 resumen los datos correspondientes a las fuentes de registros climáticos y de calidad del aire utilizados en este estudio y de las estaciones medioambientales de las que proceden dichos registros.

Tabla 8.1. Bases de datos de registros climáticos y de calidad del aire utilizados en este estudio.

Organismo	Estación	Localización		
		Latitud	Longitud	Altitud
Alcoi				
AEMET	Alcoy	38°42' 40" N	0°27'29" O	534 m
RVVCCA	Estación 03009006-Alcoi-Verge dels Lliris	38°41'17,215" N	0°28'3,513' O'	562 m
Valencia				
AEMET	Estación automática	UPV 39°28'47" O	0°20'13" O	6 m
RVVCCA	46250046-Politécnic	39°28'56,59" N	0°21'13,624" O	6 m
Vilafranca del Cid				
AEMET	Vilafranca	40°26'0" N	0°15'21" O	1131 m
RVVCCA	E s t a c i ó n : 12129001-Vilafranca	43°26'12,249" N	1°27'8,121" O	1126 m

Tabla 8.2. Características y procedencia de las variables incluidas en el estudio. T_m : temperatura media diaria, T_{max} : temperatura máxima diaria, T_{min} : temperatura mínima diaria HR_m : HR media diaria, HR_{max} : HR máxima diaria, H_{min} : HR mínima diaria; P: precipitación acumulada; C_{SO_2} : concentración de SO_2 media diaria; C_{NO_2} : concentración de NO_2 media diaria; C_{O_3} : concentración de O_3 media diaria; C_{PM10} : concentración de materia particulada de talla $10 \mu m$ media diaria; $C_{PM2,5}$: concentración de materia particulada de talla $2,5 \mu m$ media diaria.

Variable registrada	T_m	T_{max}	T_{min}	HR_m	HR_{min}	HR_{max}	P	C_{SO_2}	C_{NO_2}	C_{O_3}	$C_{PM2,5}$	C_{PM10}
Año 2021												
Alcoi	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Valencia	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vilafranca del Cid	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Año 2022												
Alcoi	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Valencia	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vilafranca del Cid	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		

8.1.3. Descarga y procesado de datos

Cada base de datos presenta métodos distintos de consulta, presentación y extracción de datos. Se describe a continuación el procedimiento seguido para obtener dichos datos de las diferentes fuentes.

Los datos facilitados por la página web de la AEMET se encuentran disponibles mediante un formulario de búsqueda, cuyos parámetros se pueden programar para obtener las variables climatológicas deseadas en las fechas y estaciones permitidas por el mismo. Para poder acceder a esta base de datos es necesario introducir una clave de acceso (API key) que se puede obtener solicitándolo a través del portal web de AEMET.

Los resultados facilitados por la base de datos AEMET (n.d.) son archivos de metadatos, donde están encriptados los parámetros de la búsqueda y sus resultados en ficheros Java Script Object Notation (JSON). Estos ficheros JSON deberán ser posteriormente convertidos en archivos de texto o Comma Separated Values (CSV) compatibles con programas de procesamiento de datos como el *software* Excel de Microsoft. En el presente estudio fue posible convertir los archivos JSON en CSV utilizando un conversor on-line que permite abrir los datos en ficheros de texto y convertirlos a Excel para posterior verificación y tratamiento (JSON, n.d.).

Los datos relativos a los niveles de concentración en aire de partículas en suspensión y contaminantes atmosféricos fueron extraídos de la base de datos de la RVVCCA-GVA (n.d.). Estos valores se descargan directamente de la base de datos donde se puede elegir la fecha y las estaciones a consultar. Los archivos en formato CSV son fácilmente transportable a Excel (figura 8.2). Algunos datos ausentes de la estación meteorológica en Valencia, situada en la Universitat Politècnica de València (UPV), han sido reemplazados por datos de la

estación 8416 (Viveros) muy próxima a la de la UPV. Se ha preferido dejarlos en blanco el resto de datos ausentes correspondientes a niveles de contaminantes atmosféricos.

Red: Red de vigilancia y control de la contaminación atmosférica Estación: 46250046-4

FECHA	SO2 µg/m³	NO µg/m³	NO2 µg/m³	PM10 µg/m³	NOX µg/m³	O3 µg/m³	PM2.5 µg/m³	
01/01/2018		1	7	19	9	9	62	6
02/01/2018		3	2	19	14	21	46	8
03/01/2018		3	2	21	14	25	31	8
04/01/2018		3	2	15	13	19	35	7
05/01/2018		3	2	19	13	21	34	9
06/01/2018		3	2	24	20	27	36	16
07/01/2018		3	1	12	8	14	50	7
08/01/2018	4	10	36	23	51	28	15	15
09/01/2018	3	5	30	18	37	31	14	14
10/01/2018	3	4	20	9	26	44	6	5
11/01/2018	3	2	15	11	18	57	5	5
12/01/2018	3	19	44	22	73	24	12	12
13/01/2018	3	5	31	17	38	30	12	12
14/01/2018	3	3	23	11	27	43	8	8
15/01/2018	3	9	39	18	53	26	11	11
16/01/2018	3	4	26	19	33	38	9	9
17/01/2018	3	9	33	21	46	33	10	10
18/01/2018	8	18	51	32	79	22	19	19
19/01/2018	5	33	50	44	100	18	26	26
20/01/2018	8	4	23	17	29	41	10	10
21/01/2018	5	1	11	9	12	48	6	6
22/01/2018	4	8	32	19	44	23	11	11
23/01/2018	4	31	50	37	97	12	22	22
24/01/2018	5	23	38	43	74	23	29	29
25/01/2018		10	35	56	51	22	48	48
26/01/2018		3	25	10	30	38	6	6
27/01/2018		1	14	14	16	51	8	8
28/01/2018		1	7	31	9	60	22	22
29/01/2018	3	27	39	33	80	29	24	24
30/01/2018	3	18	45	38	72	19	28	28

Figura 8.2. Archivo CSV descargado de la base de datos RVVCCA-GVA.

8.1.4. Análisis de datos

Los datos descargados de las bases de datos-fuente han sido:

- T_m : temperatura media diaria (°C).
- T_{max} : temperatura máxima diaria (°C).
- T_{min} : temperatura mínima diaria (°C).
- HR_m : HR media diaria (%).
- HR_{max} : HR máxima diaria (%).
- H_{min} : HR mínima diaria (%).
- P: precipitación acumulada diaria (mm).
- c_{SO_2} : concentración de SO_2 media diaria ($\mu g m^{-3}$).
- c_{NO_2} : concentración de NO_2 media diaria ($\mu g m^{-3}$).
- c_{O_3} : concentración de O_3 media diaria ($\mu g m^{-3}$).
- $c_{PM_{10}}$: concentración de materia particulada de talla 10 μm media diaria ($\mu g m^{-3}$).
- $c_{PM_{2,5}}$: concentración de materia particulada de talla 2,5 μm media diaria ($\mu g m^{-3}$).

Estos datos han sido sometidos a diversos tratamientos seguidamente descritos:

- *Representación gráfica de las series de datos originales*: para todas las variables estudiadas, excepto para la variable “precipitación diaria acumulada”, se han obtenido series de valores medios diarios. En estas gráficas no es posible observar con claridad el comportamiento de las variables meteorológicas a lo largo del año, no obstante, permiten detectar valores atípicos, rango de fluctuaciones de corto plazo (unos días), y baches (datos perdidos o faltantes).

- *Representación gráfica de los valores promedio mensuales*: estas gráficas complementan las anteriores y permiten reconocer mejor las tendencias o ciclos estacionales de las variables meteorológicas y de calidad del aire, así como detectar posibles ciclos ocasionales.
- *Representación gráfica de los promedios mensuales de valores de oscilación diaria*: estas gráficas permiten identificar los periodos en los que las oscilaciones térmicas o de HR exceden los umbrales aceptables para la conservación de patrimonio cultural.
- *Representación gráfica de valores medios diarios ordenados en orden creciente*: permite efectuar un análisis gráfico de la distribución de los valores diarios en función de la magnitud de la variable, lo cual permite conocer el número de días al año en que dicha variable supera un determinado valor umbral.
- *Gráfico de dispersión*: proporciona una imagen gráfica de la posible correlación o dependencia entre una pareja de variables.
- *Cálculo de parámetros estadísticos básicos*:
 - a) *Amplitud*: diferencia entre los valores máximos y mínimos correspondientes a un cierto periodo, por ejemplo, un día, un mes, una estación, un año. Si se refiere a temperaturas se denomina amplitud u oscilación térmica (VV.AA., 2014).
 - b) *Extremos máximo y mínimo*: referidos a un día, y a un año, son los valores máximo y mínimo registrados para la variable en el periodo prefijado.
 - c) *Valor promedio o normal*: media aritmética de los valores correspondientes a un determinado periodo (día, semana, mes, año, decenio). Aunque el valor normal se suele referir en meteorología a periodos de 30 años, en este estudio se considera valor normal al valor medio calculado en un cierto periodo, por ejemplo, un ciclo, un mes, un año.
 - d) *Desviación estándar*: indica el grado de dispersión de los valores contenidos en una muestra.
 - e) *Coefficiente de variación de la muestra o error relativo estándar*: expresada en porcentaje y, calculada como cociente entre la desviación estándar y el valor promedio de una variable, permite comparar el grado de dispersión de las diferentes series de datos registrados en una muestra para las variables en estudio.
 - f) *Coefficiente de asimetría de Fisher*: indica la mayor o menor tendencia de los valores de la muestra (temperatura, HR, etc.) a situarse por encima o por debajo del valor medio. Valores positivos indican que la mayoría de los datos se sitúan por encima de la media, mientras que los valores negativos indican que la mayoría de valores está por debajo de la media.
 - g) *Regresión*: es un método de análisis multivariante, incluido en la estadística inferencial, que permite la caracterización de una muestra sobre la que actúa más de una variable para conocer las relaciones existentes entre las variables y cómo influyen en la muestra. El grado de correspondencia de las variables se expresa numéricamente mediante **el coeficiente de correlación**.

8.2. Alcoi

El clima de un lugar geográficamente localizado en la zona templada de la Tierra se caracteriza por la estacionalidad. Para caracterizar la estacionalidad del clima de la Comunitat Valenciana se ha estudiado el comportamiento meteorológico diario a lo largo de los años 2021 y 2022¹. Los datos suministrados por AEMET y por la RVVCCA-GVA en estos años proporcionan información suficiente para comprender los rasgos más relevantes del mesoclima de cada población seleccionada y la calidad del aire de la zona. En los siguientes subapartados se describen los resultados obtenidos en Alcoi.

8.2.1. Meteorología

Las figuras 8.3 a 8.6 muestran las gráficas de la temperatura media y los extremos máximo y mínimo diario registrados en función del tiempo durante los años 2021 y 2022.

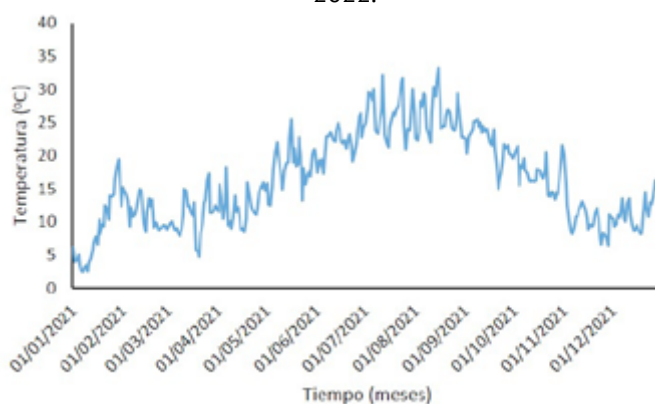


Figura 8.3. Variación de la temperatura diaria media en Alcoi en el año 2021.

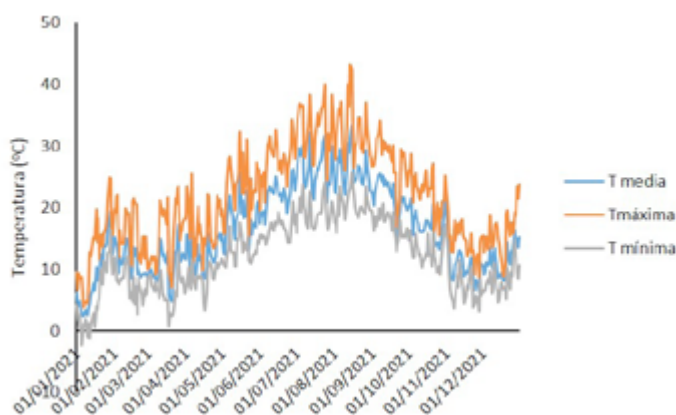


Figura 8.4. Variación de la temperatura diaria media, máxima y mínima en Alcoi en el año 2021.

¹ La limitación del proyecto I+D a los años 2021, 2022 y 2023 (finalización 31-12-2023) ha impedido evaluar más anualidades.

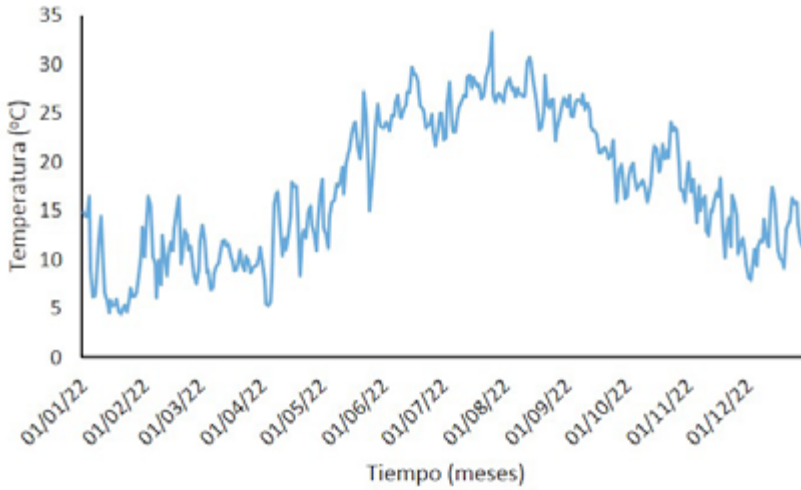


Figura 8.5. Variación de la temperatura diaria media en Alcoi en el año 2022.

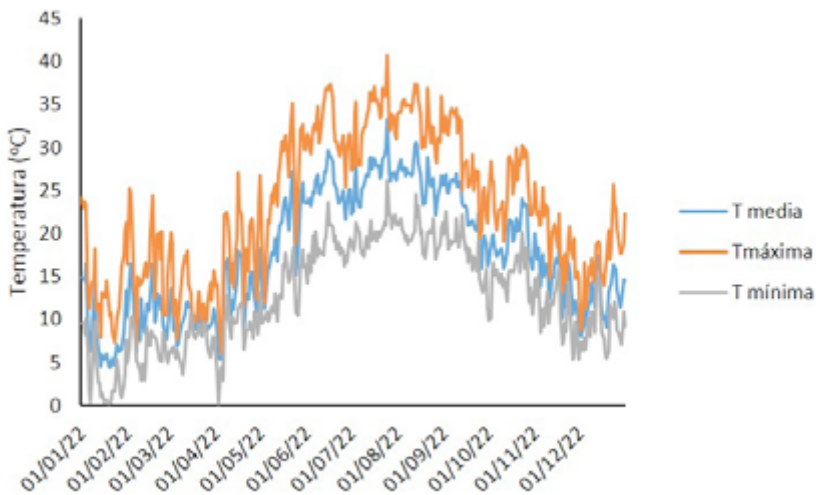


Figura 8.6. Variación de la temperatura diaria media, máxima y mínima en Alcoi en el año 2022.

En las figuras 8.3 y 8.5 se observa la existencia, a lo largo del año, de fluctuaciones de la temperatura media diaria en forma de ciclos irregulares, cuya duración oscila entre 4 y 8 días, que llegan a tener una amplitud de 20 °C. Se aprecian, también, sobreimpuestas a los ciclos cortos irregulares, las tendencias crecientes y decrecientes estacionales. Las temperaturas máxima y mínima diarias, que se presentan en las figuras 8.4 y 8.6 junto a la temperatura media, exhiben similares oscilaciones cíclicas irregulares y tendencias estacionales que los valores medios.

Las figuras 8.7 a 8.10 muestran las curvas de variación de la HR media, máxima y mínima diaria a lo largo de los años 2021 y 2022.

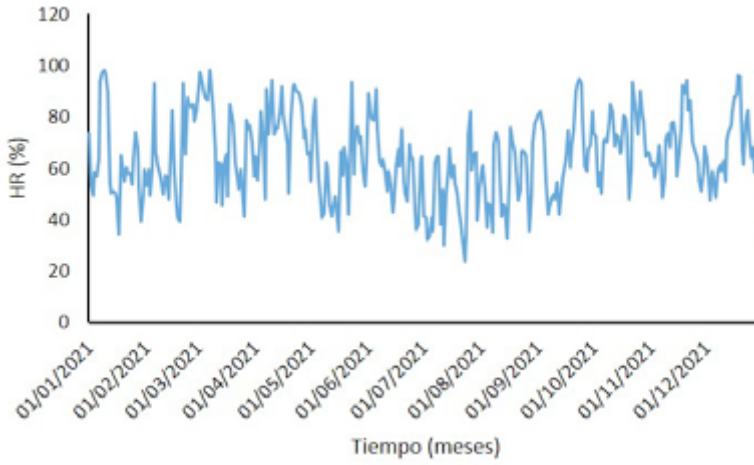


Figura 8.7. Variación de la humedad relativa diaria media en Alcoi en el año 2021.

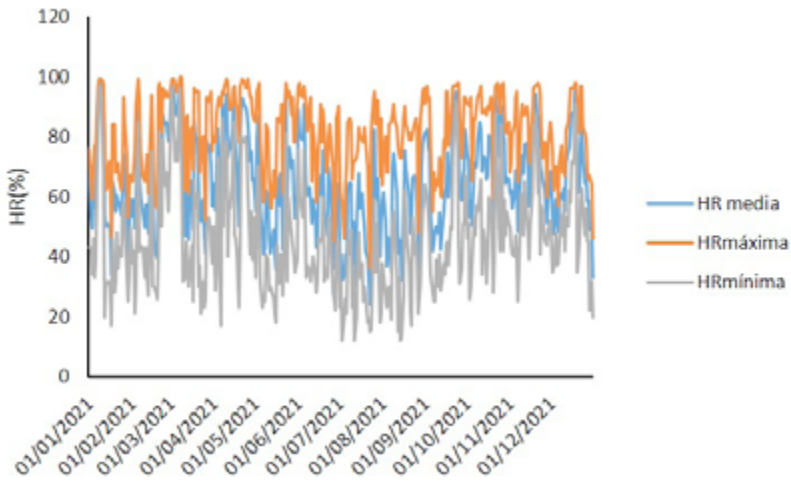


Figura 8.8. Variación de la HR diaria media, máxima y mínima en Alcoi en el año 2021.

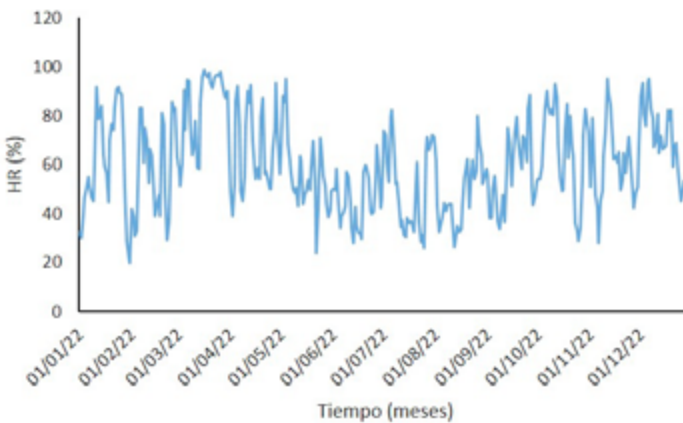


Figura 8.9. Variación de la humedad relativa diaria media en Alcoi en el año 2022.

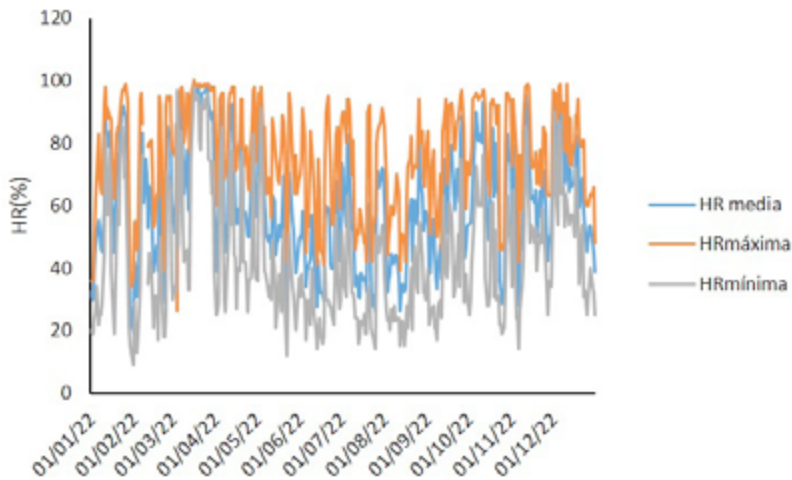


Figura 8.10. Variación de la HR diaria media, máxima y mínima en Alcoi en el año 2022.

De modo similar a la temperatura, los valores de HR media diaria experimentan fluctuaciones irregulares con una duración que oscila entre 4 y 9 días. Estas oscilaciones llegan a alcanzar amplitudes de 70 unidades porcentuales, en ambos años. Las HR máxima y mínima, que se presentan en las figuras 8.8 y 8.10 junto a la HR media, muestran las mismas oscilaciones cíclicas irregulares que los valores medios.

Las figuras 8.11 y 8.12 muestran los valores diarios de precipitación reportados en los años 2021 y 2022 en Alcoi. Se aprecia con claridad la existencia de ciclos irregulares asociados a períodos de varios días con acumulación de precipitaciones, que pueden llegar a ser de gran intensidad, intercalados con otros de escasa acumulación o ausencia de precipitaciones.

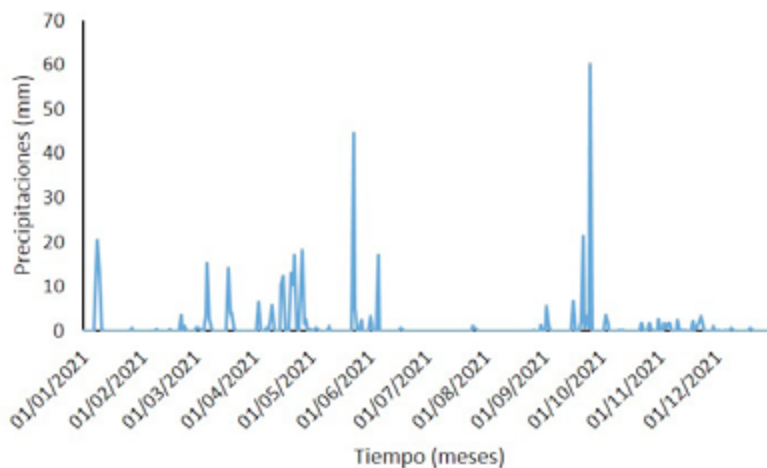


Figura 8.11. Variación de las precipitaciones en Alcoi en 2021.

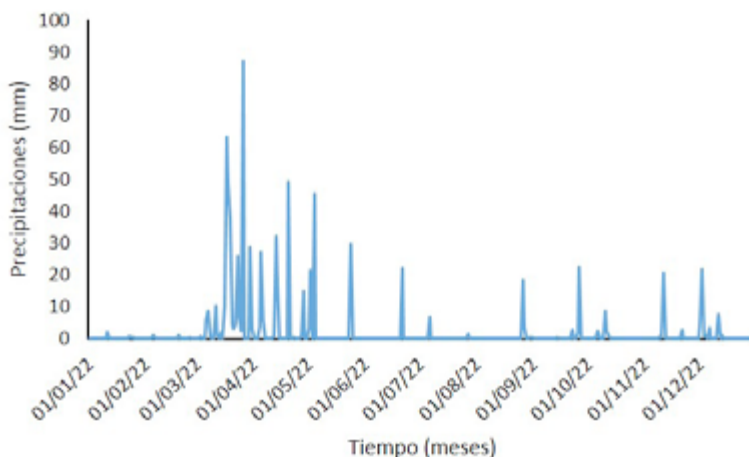


Figura 8.12. Variación de las precipitaciones en Alcoi en 2022.

Los valores medios mensuales de temperatura y humedad relativa y los acumulados de precipitación mensual registrados en Alcoi durante los años 2021 y 2022 se resumen en las tablas 8.3 y 8.4.

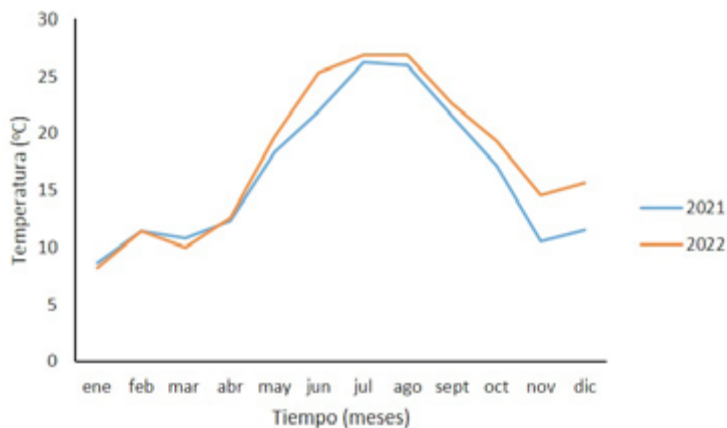
Tabla 8.3. Valores medios mensuales de variables meteorológicas registrados en Alcoi en 2021. T (°C), HR (%), Precipitación (mm).

Mes	Valores mensuales						
	T _{media}	T _{mínima}	T _{máxima}	HR _{media}	HR _{mínima}	HR _{máxima}	Precipitación
Enero	8,61	-2,4	24,8	62,2	17	99	55,6
Febrero	11,43	2,8	22,1	65,67	21	99	5,4
Marzo	10,76	0,8	23,5	70,93	21	100	46,6
Abril	12,36	3,3	25,5	76,86	17	99	108,2
Mayo	18,37	10,3	32,3	59,12	18	98	54,6
Junio	21,96	14	34,4	61,75	22	98	21,4
Julio	26,25	16,1	40	49,83	12	95	1,8
Agosto	25,99	16,1	43,2	57,14	12	96	1,4
Septiembre	21,58	12,9	34,1	66,35	25	98	60
Octubre	17,15	9,3	28,7	72,18	26	98	11,8
Noviembre	10,55	3,2	22,9	68,78	25	98	19,6
Diciembre	11,53	4,6	23,8	65,73	20	98	2,6

Tabla 8.4. Valores medios mensuales de variables meteorológicas registrados en Alcoi en 2022. T (°C), HR (%), Precipitación (mm).

Mes	Valores mensuales						
	T _{media}	T _{mínima}	T _{máxima}	HR _{media}	HR _{mínima}	HR _{máxima}	Precipitación
Enero	8,2	0,3	24,1	60,48	9	99	3,6
Febrero	11,44	2,90	25,20	55,98	13,00	96,00	2,60
Marzo	10,01	3,80	20,10	83,47	30,00	100,00	387,6
Abril	12,62	0,20	27,10	65,86	25,00	98,00	153,80
Mayo	19,72	9,50	35,20	56,36	12,00	98,00	100,00
Junio	25,29	14,20	37,30	45,67	14,00	95,00	22,20
Julio	26,83	17,30	40,70	51,68	14,00	94,00	8,60
Agosto	26,82	17,00	37,30	48,11	15,00	94,00	23,20
Septiembre	22,66	11,30	34,50	56,94	17,00	97,00	27,80
Octubre	19,34	9,90	30,20	66,53	19,00	97,00	14,20
Noviembre	14,59	5,30	25,90	60,49	14,00	99,00	25,00
Diciembre	15,60	12,55	5,50	68,50	25,00	99,00	40,80

Las tendencias estacionales de las variables meteorológicas se pueden apreciar mejor eliminando las fluctuaciones asociadas a ciclos cortos irregulares mediante la representación de los valores medios mensuales de temperatura, HR y precipitación que figuran en las tablas 8.3 y 8.4. Como muestra la figura 8.13, durante los años 2021 y 2022 se repitió la tendencia creciente de temperaturas que se inicia en enero y se prolonga hasta agosto, mes en el que se invierte la tendencia y las temperaturas medias diarias gradualmente van disminuyendo hasta noviembre. Siguiendo el ciclo estacional de climas templados, la temperatura media mensual se mantiene por debajo de los 10 °C desde noviembre hasta marzo (invierno), entre 10 y 20 °C en abril, mayo (primavera) y octubre (otoño) y supera los 20 °C en los meses de julio, agosto y septiembre (verano).

**Figura 8.13.** Variación del promedio mensual de temperatura diaria en Alcoi en 2021 y 2022.

La figura 8.14 muestra la variación de la HR media mensual. En esta gráfica se aprecian mejor las tendencias estacionales que se caracterizan por un ligero descenso de la HR en los meses de estío, por debajo de 60 %, para ir incrementándose progresivamente a lo largo del otoño y mostrar un comportamiento más irregular en invierno y primavera, coincidiendo con un mayor nivel de precipitaciones, como se describirá seguidamente.

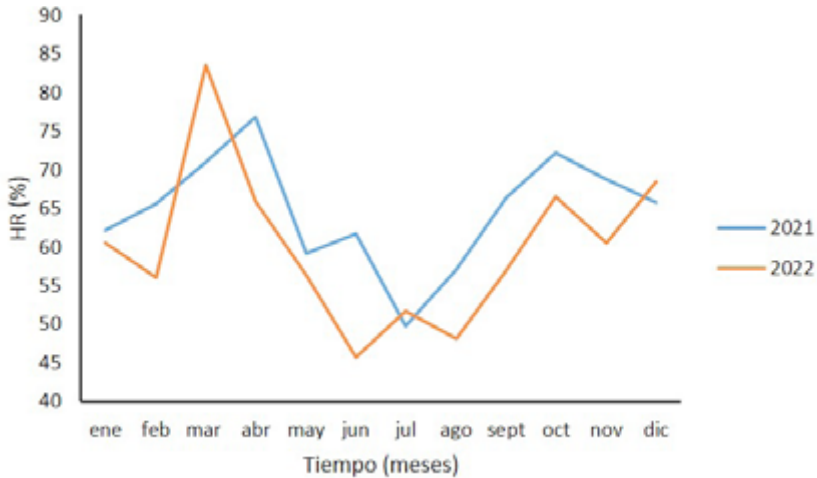


Figura 8.14. Variación del promedio mensual de HR diaria en Alcoi en 2021 y 2022.

La figura 8.15 muestra la variación de las precipitaciones mensuales medias en Alcoi en 2021 y 2022. Las tendencias estacionales se caracterizan por un notable aumento de las precipitaciones en el periodo primaveral, llegándose a acumular valores de casi 400 mm en un mes en 2022 y 100 mm en 2021, y un segundo ciclo de precipitaciones de menor intensidad en otoño. Llama la atención un ciclo de lluvias particularmente intenso y atípico acaecido en la primavera de 2022.

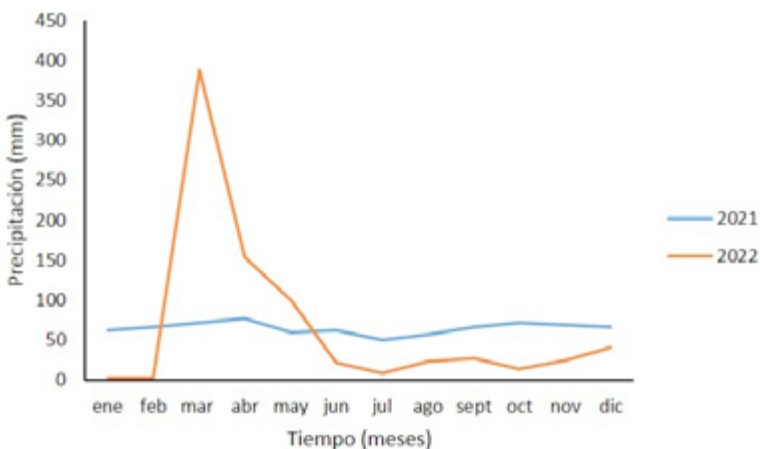


Figura 8.15. Variación del promedio mensual de precipitación diaria en Alcoi en 2021 y 2022

Se observa una cierta correlación entre los valores de HR medios mensuales y la precipitación acumulada, como muestra la gráfica de dispersión de la figura 8.16. Los coeficientes de correlación toman valores de 0,50 en 2021 y 0,75 en 2022.

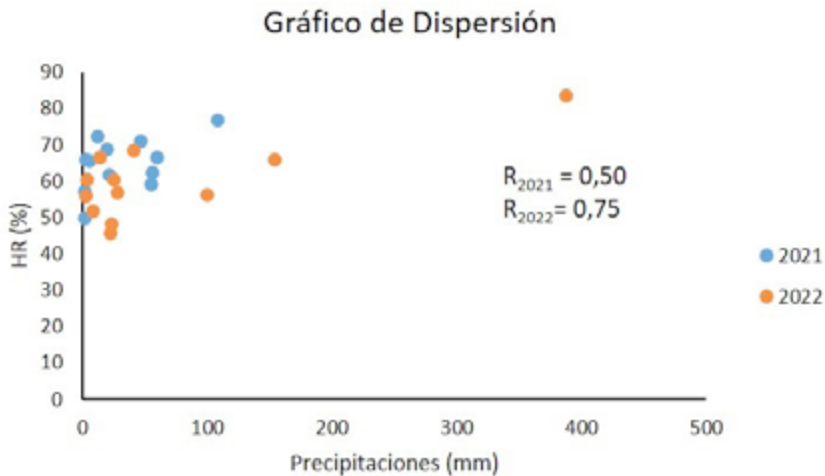


Figura 8.16. Gráfico de regresión de la variable HR frente a las precipitaciones acumuladas. R_{2021} y R_{2022} : coeficientes de regresión correspondientes a los años 2021 y 2022.

La tabla 8.5 sintetiza los parámetros estadísticos calculados para las variables meteorológicas. Las medias anuales de temperatura se mantienen por debajo de 20 °C, acompañadas de valores máximos que superan los 40 °C y mínimos de 0 °C y ligeramente por debajo de esta temperatura. Las oscilaciones térmicas diarias pueden superar los 20 °C. La dispersión de la temperatura media diaria, dada por el error relativo estándar, alcanza un 41 % con una tendencia de los valores a situarse por encima de la media, tal como indica el valor positivo del coeficiente de asimetría de Fisher. La HR media anual es de 65 % en 2021 y 60 % en 2022. Estos valores son bastante acordes con una localización continental con frecuentes periodos de lluvia. Los valores máximos de HR media diaria son 100 % en 2021 y 2022 y los mínimos de 12 % y 9 % en 2021 y 2022, respectivamente, lo que da unas amplitudes de HR de 73 % en 2021 y 71 % en 2022. La dispersión de los valores medios diarios de HR, calculada a partir de la desviación estándar y el error relativo estándar, se establece en valores de 20 y 25 % en 2021 y 20 y 31 % en 2022. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado es 0,1 para 2021 y 0,2 para 2022, lo que pone de manifiesto la tendencia de los valores de HR a situarse ligeramente por encima de la media anual. Por otra parte, los tiempos de humectación (TOW, por sus siglas en inglés) reportados para ambas anualidades son 92 y 76 días. Cabe resaltar que, pese a que en 2022 el número de días en los que se registraron lluvias fue menor que en 2021, la cantidad de agua caída fue superior, lo que es indicativo de la existencia de fenómenos tormentosos más extremos en 2022.

Tabla 8.5. Parámetros estadísticos de variables meteorológicas en Alcoi.

Año	Valor máximo anual	Valor mínimo anual	Amplitud anual máxima	Valor medio	Desviación estándar	Error relativo estándar	Coefficiente de asimetría de Fisher
Temperatura (°C)							
2021	43,2	-2,4	20,1	16	6	41	0,2
2022	40,7	0,2	18,2	18	7	41	0,1
Humedad Relativa (%)							
2021	100	12	73	65	20	25	0,1
2022	100	9	71	60	20	31	0,2
Precipitación	TOW (días)	Máximo diario anual (mm)		Total anual acumulado (mm)			
2021	92	60		423,6			
2022	76	87,2		779,8			

8.2.2. Calidad del aire

Las figuras 8.17 a 8.22, 8.24 y 8.25 muestran la variación de los niveles medios diarios de contaminantes SO₂, NO₂, O₃ y PM10 en Alcoi durante los años 2021 y 2022.

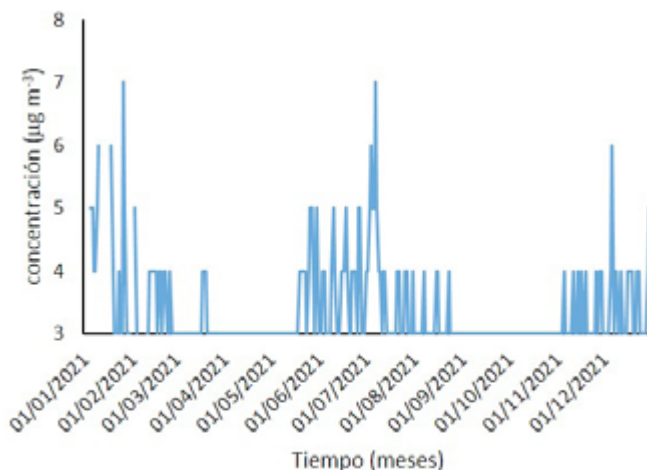


Figura 8.17. Variación del nivel medio diario de SO₂, en aire en el año 2021.

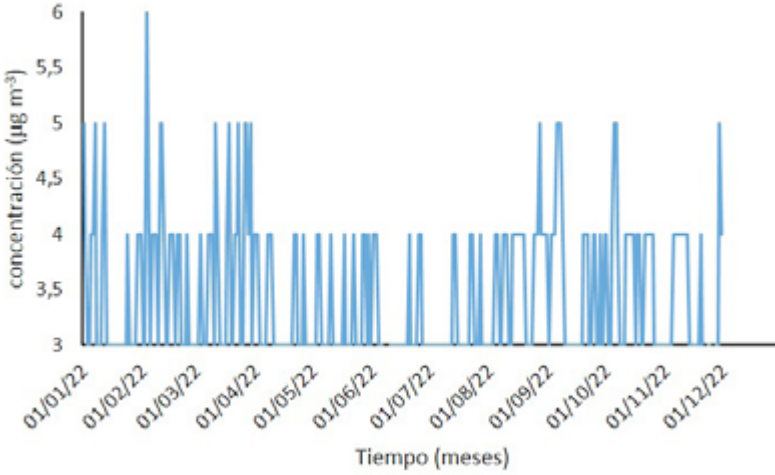


Figura 8.18. Variación del nivel medio diario de SO_2 , en aire en 2022.

Los valores tan bajos de concentración de SO_2 indican que la industrialización de la zona no parece estar contribuyendo de manera apreciable a la emisión de este gas de efecto invernadero (GEI). Consecuentemente, este contaminante presenta poca variación diaria estacional, registrando los valores diarios más elevados en invierno y primavera y los mínimos en verano (figuras 8.17 y 8.18). Tampoco se encuentra una diferencia significativa entre los valores medios semanales y de fin de semana.

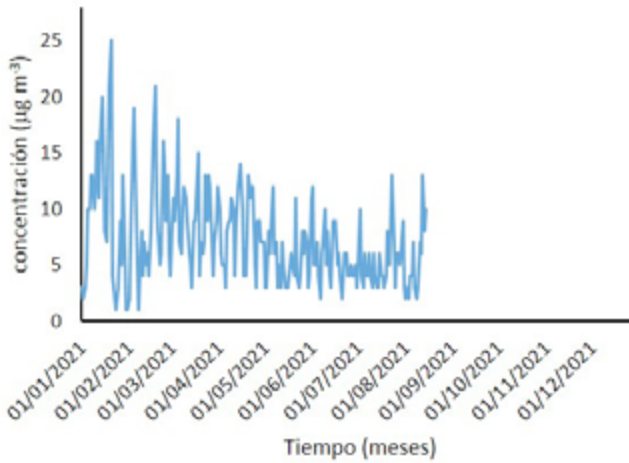


Figura 8.19. Variación del nivel medio diario de NO_2 , en aire en 2021.

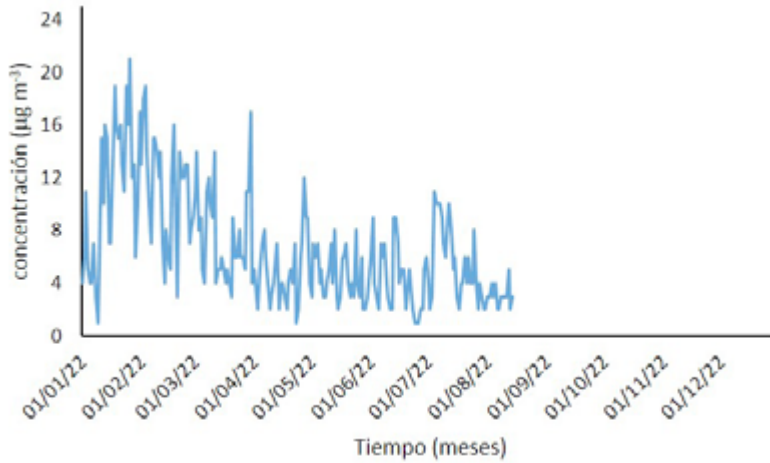


Figura 8.20. Variación del nivel medio diario de NO_2 , en aire en 2022.

Los registros diarios de esta población muestran una tendencia estacional con máximos en enero y febrero y progresiva reducción de los valores diarios del invierno a la primavera y, de esta, al verano y, presumiblemente, ya que no se han registrado datos, el progresivo aumento del otoño al invierno en ambos años (figuras 8.19 y 8.20).

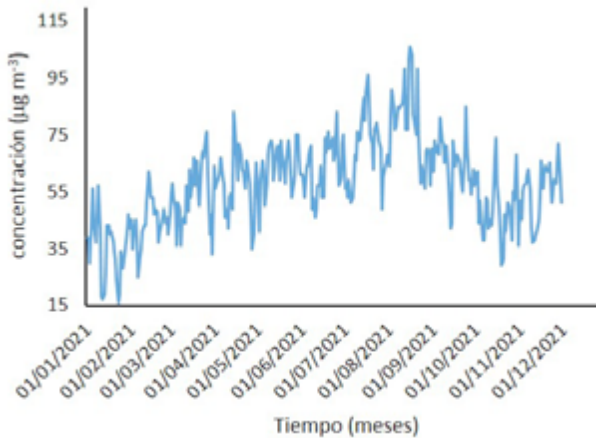


Figura 8.21. Variación del nivel medio diario de O_3 , en aire en 2021.

En las figuras 8.21 y 8.22 también se aprecian fluctuaciones cortas, de tres o cuatro días, en las que la concentración de ozono puede variar del orden de $50 \mu\text{g m}^{-3}$. Además, se observa que la variación estacional exhibe los valores más elevados en primavera y verano y los valores más bajos en otoño e invierno. El factor determinante de este aumento de la concentración en los períodos de primavera y verano es, sin duda, el incremento de la intensidad de la luz solar y el mayor número de horas con insolación. Tidblad *et al.*, (2009) han descrito un proceso de formación de O_3 , que tiene lugar a nivel del suelo, a partir de la descomposición de NO_2 fotocatalizada por radiación UV. En atmósferas contaminadas, el O_3 tiende a descomponerse reaccionando con el NO presente en la atmósfera para formar

NO_2 . Sin embargo, en áreas rurales con bajos niveles de contaminantes y, específicamente, de NO , este segundo proceso tiene lugar escasamente, lo que hace incrementar la concentración de O_3 . Esto podría justificar, en parte, estas concentraciones tan elevadas. Sin embargo, no se ha observado la existencia de correlación entre las concentraciones de ambos contaminantes. Por otra parte, se ha observado que las variaciones estacionales de la concentración exhibida por O_3 se correlaciona con las de la temperatura. Como es bien sabido, todos los procesos reactivos incrementan su velocidad con la temperatura. Por tanto, cabría suponer que este podría ser otro factor que, junto con la radiación luminosa, podría acelerar el proceso de formación de O_3 . La correlación entre la concentración de O_3 y la temperatura se aprecia muy bien en la gráfica de dispersión de la figura 8.23 donde se han representado los valores de concentración media diaria de O_3 frente a los valores medios de temperatura durante los dos años en estudio. Los coeficientes de correlación calculados para 2021 y 2022 son 0,57 y 0,63, respectivamente. Los valores de este parámetro estadístico de regresión ponen de manifiesto la existencia de una moderada correlación entre temperatura y concentración de O_3 .

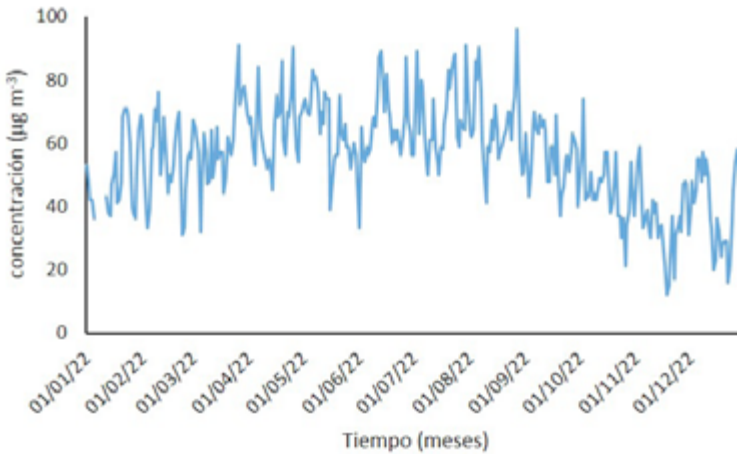


Figura 8.22. Variación del nivel medio diario de O_3 , en aire en 2022.

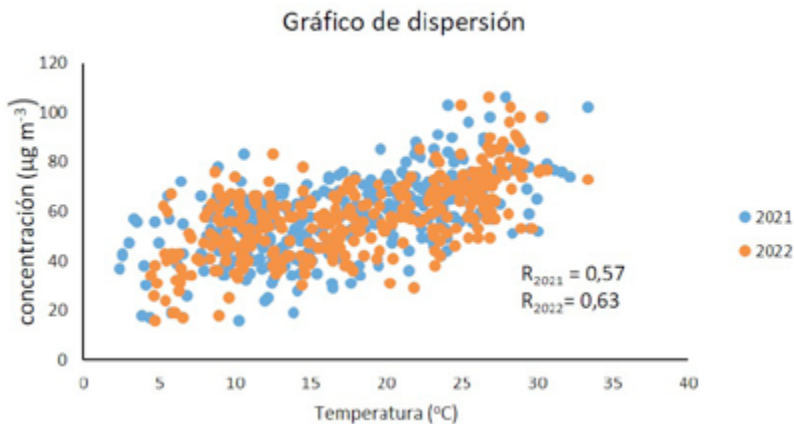


Figura 8.23. Gráfico de regresión de la variable concentración de O_3 frente la temperatura. R_{2021} y R_{2022} : coeficientes de regresión correspondientes a los años 2021 y 2022.

En las figuras 8.24 y 8.25 se aprecian fluctuaciones cortas, de tres o cuatro días, en las que la concentración de PM10 puede variar del orden de $50 \mu\text{g m}^{-3}$. No se observa una variación estacional clara, aunque los valores registrados en primavera y verano parecen ser ligeramente mayores que los valores registrados en otoño e invierno.

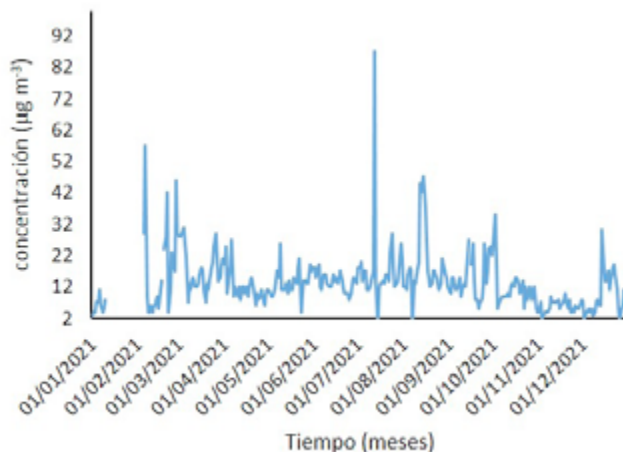


Figura 8.24. Variación del nivel medio diario de PM10, en aire en 2021.

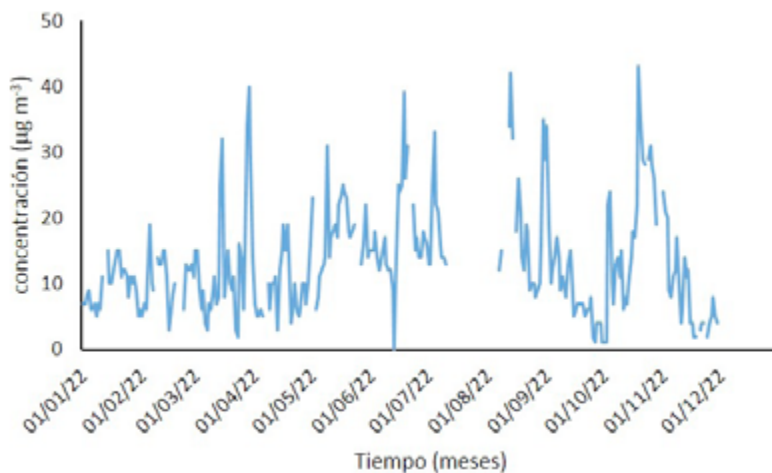


Figura 8.25. Variación del nivel medio diario de PM10, en aire en 2022.

En la tabla 8.6 se resumen los parámetros estadísticos obtenidos para los registros de variables de calidad del aire en los años 2021 y 2022 en la ciudad de Alcoi.

Tabla 8.6. Parámetros estadísticos.

Año	Valor máximo anual	Valor mínimo	Valor medio	Desviación estándar	Error relativo estándar	Coefficiente de asimetría de Fisher
Nivel de SO₂ (mg m⁻³)						
2021	7	3	3,4	0,7	21	2,2
2022	6	3	3,5	0,6	18	1,1
Nivel de NO₂ (mg m⁻³)						
2021	25	1	7,3	4	58	1,1
2022	21	1	13	4	65	1,1
Nivel de O₃ (mg m⁻³)						
2021	106	16	58	16	27	0,1
2022	96	12	56	16	28	-0,1
PM10 (mg m⁻³)						
2021	87	2	13,6	9	65	2,9
2022	43	2	13,3	8	60	1,1

El valor de la concentración diaria media de SO₂ en 2021 fue 3,4 µg m⁻³, siendo el valor más bajo registrado a lo largo del año 3 µg m⁻³, y el más elevado, registrado en el mes de diciembre, 7 µg m⁻³. La concentración media de SO₂ en 2022 fue 3,5 µg m⁻³, siendo el valor más bajo registrado en la anualidad 3 µg m⁻³, y el más elevado 6 µg m⁻³. La dispersión de valores medios diarios, calculada a partir de la desviación estándar y el error relativo estándar, se establece en 0,7 y 21 % en 2021 y 0,6 y 18 % en 2022, respectivamente. El coeficiente de asimetría de Fisher, calculado para 2021, es 2,2 para 2021 y 1,1 para 2022, lo que pone de manifiesto la tendencia clara de los valores a situarse por encima de la media en los dos años.

El valor de la concentración media diaria de NO₂ en 2021 fue 7,3 µg m⁻³, acompañado de máximos y mínimos anuales de 25 µg m⁻³ y 1 µg m⁻³. En 2022 el valor medio registrado fue 13, µg m⁻³ con valores máximo y mínimo de 21 y 1 µg m⁻³ (tabla 8.6). La dispersión de valores medios diarios, calculada a partir de la desviación estándar y el error relativo estándar, se sitúa en valores de 4 y 58 % en 2021 y 4 y 65 % en 2022. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado para 2021 es 1,1 para 2021 y 2022, lo que pone de manifiesto el carácter netamente positivo de la distribución de valores en ambos años.

Ozono es el contaminante que ha mostrado valores más elevados de los cuatro en estudio. La concentración media diaria de O₃ en 2021 fue 58 µg m⁻³, siendo el valor más bajo registrado a lo largo del año 16 µg m⁻³ y el más elevado, 106 µg m⁻³. La concentración media de O₃ en 2022 fue 56 µg m⁻³, siendo el valor más bajo registrado 12 µg m⁻³ y el más elevado 96 µg m⁻³. La dispersión de valores medios diarios, calculada a partir de la desviación estándar y el error relativo estándar, se establece en valores de 16 y 27 % en 2021 y 16 y 28 % en 2022. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado para 2021 es 0,1 para 2021 y -0,1 para 2022, lo que muestra una tendencia opuesta en cada año.

El contaminante PM10 también ha mostrado valores elevados de concentración en el aire. La concentración media diaria de PM10 en 2021 fue $13,6 \mu\text{g m}^{-3}$, registrándose un valor de $2 \mu\text{g m}^{-3}$ como el más bajo a lo largo del año y $87 \mu\text{g m}^{-3}$, como el más elevado. En 2022 la concentración media de PM10 fue $13,3 \mu\text{g m}^{-3}$, siendo el valor más bajo registrado $2 \mu\text{g m}^{-3}$ y el más elevado $43 \mu\text{g m}^{-3}$. La dispersión de valores medios diarios para la desviación estándar y el error relativo estándar se establece en 9 y 65 % en 2021 y 8 y 60 % en 2022. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado para 2021 es 2,9 y 1,1 para 2022, lo que muestra una clara tendencia hacia valores por encima de la media.

Las tendencias estacionales pueden estudiarse y compararse mejor a partir de las gráficas de valores medios mensuales que se muestran en las figuras 8.26 a 8.29 para los cuatro contaminantes en los años 2021 y 2022.

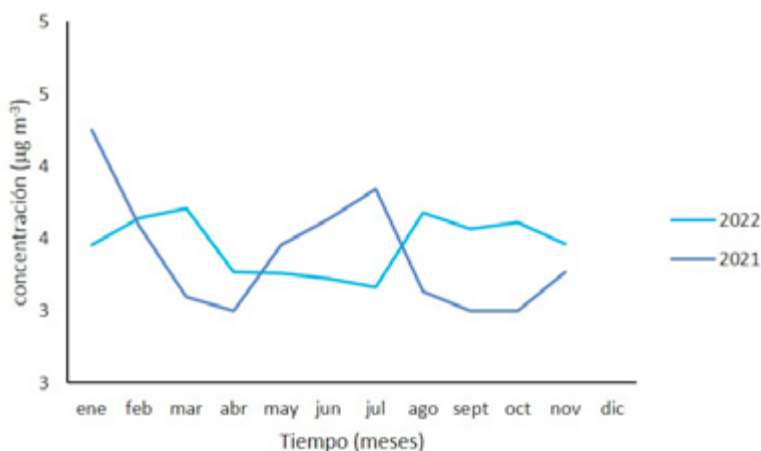


Figura 8.26. Variación de la concentración media mensual de SO₂ en Alcoi en 2021 y 2022.

Las curvas de la figura 8.26 evidencian la ausencia de tendencia estacional debido a los bajos niveles de concentración exhibidos por este contaminante.

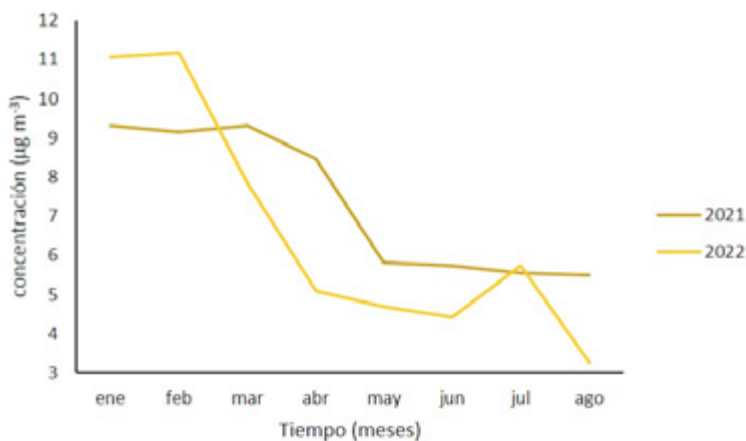


Figura 8.27. Variación de la concentración media mensual de NO₂ en Alcoi en 2021 y 2022.

Las gráficas de la figura 8.27 ponen de manifiesto la tendencia de este contaminante a incrementar sus valores en otoño e invierno, con máximos en esta última estación, y reducirlos en las estaciones cálidas.

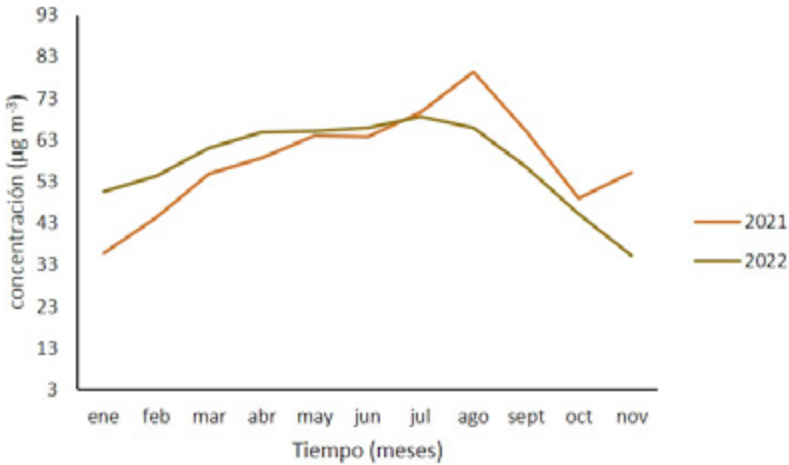


Figura 8.28. Variación de la concentración media mensual de O₃ en Alcoi en 2021 y 2022.

Las gráficas de la figura 8.28 ponen de manifiesto la clara tendencia de este contaminante a incrementar sus valores en verano, y reducirlos en las estaciones frías.

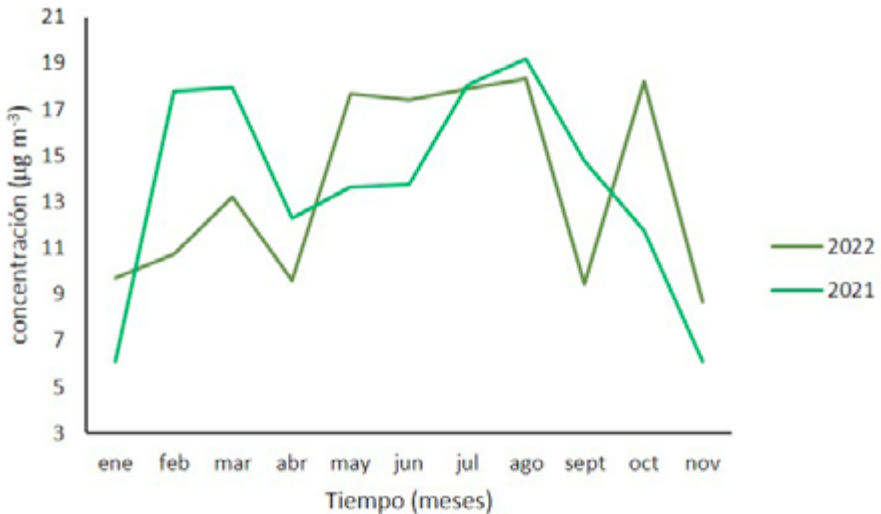


Figura 8.29. Variación de la concentración media mensual de PM10 en Alcoi en 2021 y 2022.

Las gráficas de la figura 8.29 muestran ciclos irregulares con máximos en todas las estaciones.

8.2.3. Implicaciones en la conservación de patrimonio ferrotraviario

El análisis realizado acerca de las implicaciones de las condiciones climáticas de las poblaciones en estudio respecto a la conservación de patrimonio ferrotraviario se ha efectuado atendiendo a dos criterios o normativas internacionales específicas:

- *Medioambiente exterior*: la norma UNE-EN ISO 9223:2012 establece seis categorías (C1-C5 y Cx) para clasificar los ambientes al aire libre en función de la corrosividad creciente de los metales. Esta clasificación establece unos rangos de TOW y concentraciones de contaminantes para cada categoría (tablas 6.20 a 6.24).
- *Medioambiente en interiores y lugares resguardados*: de acuerdo con La Fontaine (1985), Stolow (1985) e ICOM-UNESCO (1971) (tabla 6.2), concretándose al patrimonio en metal, la temperatura y la HR deben permanecer por debajo de 20 °C y 30 %, respectivamente, las fluctuaciones diarias por debajo de $\pm 2-5$ °C y ± 10 % (Michalski, 1994) y las fluctuaciones estacionales por debajo de ± 10 °C y ± 20 %, para una adecuada conservación de este tipo de objetos. El Ministerio de Cultura (Ministerio de Cultura, 2009) recomienda no exceder los valores de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ para la concentración de SO_2 y NO_2 y $2 \mu\text{g m}^{-3}$ para la concentración de O_3 en el interior de edificios y lugares resguardados (tabla 6.9, capítulo 6). Respecto a los valores tolerables de materia particulada para patrimonio cultural, se ha seguido el criterio de la US National Information Standards Organization (Upham, 1992) que fija los valores recomendados de estos contaminantes en el aire de museos, archivos y bibliotecas en $75 \mu\text{g m}^{-3}$.

La tabla 8.7 resume el número de días y tasa anual de tiempo, expresada en porcentaje (entre paréntesis), en que los valores medios de las variables meteorológicas registradas fueron superiores a los valores aceptables en conservación del patrimonio metálico. Los valores de TOW de 2208 y 1824 h registrados en 2021 y 2022, respectivamente, son relativamente favorables. Al tratarse de tasas anuales inferiores al 25 % en ambas anualidades sitúan a Alcoi en la categoría C2 de corrosividades al aire libre según la norma UNE-EN ISO 9223:2012 (tabla 6.21). La temperatura se mantiene por encima del valor aceptable un número de días inferior al 40 % del año en ambas anualidades. Sin embargo, la HR se mantiene en valores superiores al aconsejable durante la práctica totalidad del año. Por tanto, el clima de Alcoi no sería muy adecuado para la conservación de estos bienes culturales, especialmente, durante los 125 y 142 días de 2021 y 2022, respectivamente, en los que la temperatura media diaria se mantuvo por encima de 20 °C y la HR superó el 30 %.

Tabla 8.7. Tasa anual de tiempo en que los niveles de variables meteorológicas superan los valores aceptables en conservación del patrimonio.

Año	Número de días al año sobrepasando el valor tolerable	Número de días al año sobrepasando el valor tolerable de oscilación diaria
Temperatura	T > 20 °C	$\Delta T > \pm 2-5$ °C
2021	125 (34,3 %)	359 (98,4 %)
2022	142 (38,0 %)	346 (94,7 %)
HR	HR > 30 %	HR > 10 %

2021	363 (99,5 %)	353 (96,7 %)
2022	352 (96,4 %)	360 (98,6 %)
Precipitaciones	TOW	
2021	92 días= 2208 h (25,2 %)	
2022	76 días= 1824 h (20,8 %)	

Por lo que respecta a las fluctuaciones de temperatura y HR, este problema hay que considerarlo, a tres niveles: fluctuaciones diarias, fluctuaciones en ciclos cortos de varios días y fluctuaciones estacionales. La figura 8.30 presenta un gráfico en el que se muestra el valor promedio de la oscilación térmica diaria para cada mes durante los años 2021 y 2022. Se comprueba que todos los meses se sobrepasa el límite tolerable para la oscilación térmica diaria, ΔT inferior a $\pm 2-5$ °C, establecido por el Ministerio de Cultura (2009) para la conservación de objetos en el interior de edificios y ambientes resguardados. También se comprueba que las mayores amplitudes de oscilación tienen lugar en los meses estivales. Cabe recordar que los valores tolerables recomendados se refieren a objetos conservados en el interior de edificios y lugares resguardados, por lo que su uso como referencia para los valores presentados en este estudio, correspondientes a registros realizados al aire libre, debe realizarse siempre a título orientativo y con mucha cautela. No obstante, los datos reportados pueden ser de gran utilidad para comprender el comportamiento de objetos conservados en edificios no climatizados, ya que los valores de las variables meteorológicas y de calidad del aire tenderán a ser similares a los del exterior con una cierta amortiguación debida a la mayor o menor capacidad aislante que ofrezcan los muros y cerramientos de los edificios.

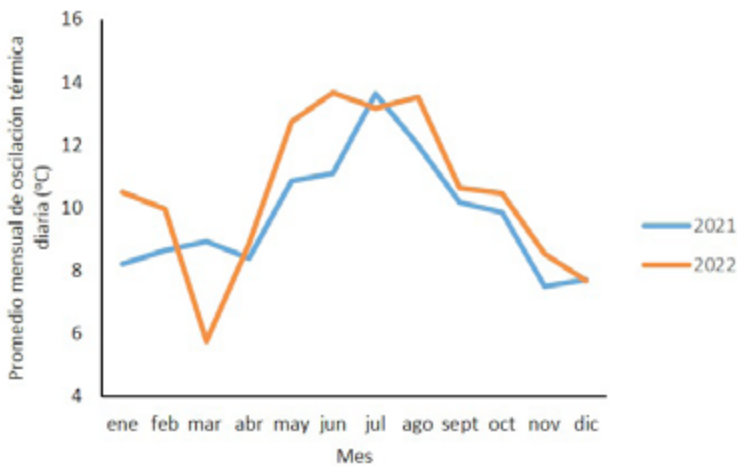


Figura 8.30. Promedio mensual de oscilación térmica diaria.

La figura 8.31 presenta un gráfico en el que se muestra el número de días en los que se registró una oscilación térmica diaria por debajo de un determinado valor a lo largo de los años 2021 y 2022. La intersección de las líneas de trazo discontinuo con el eje de abscisas indica el número de días al año en los que el valor de oscilación térmica diaria fue superior al tolerable diario (ΔT inferior a $\pm 2-5$ °C) y al tolerable estacional (ΔT inferior

a ± 10 °C). En el primer caso se comprueba que la mayor parte de días del año se superó el valor máximo admisible.

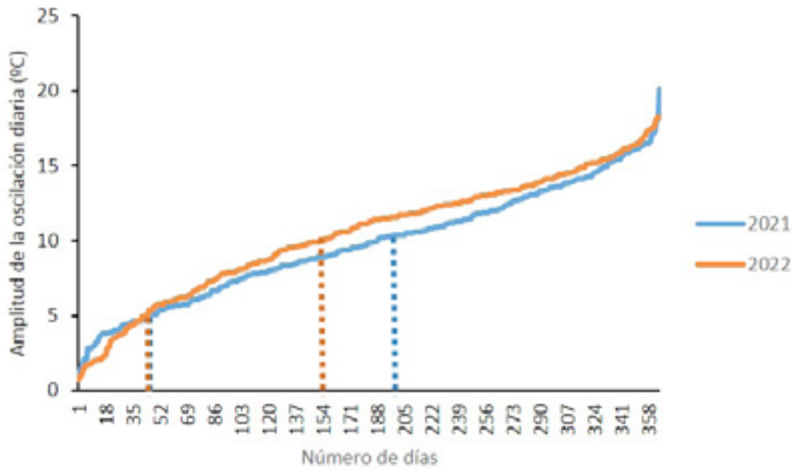


Figura 8.31. Grafica mostrando el número de días con oscilación diaria de temperatura por debajo de un cierto valor.

El promedio mensual de oscilación diaria de HR se ha representado en la figura 8.32. También para esta variable se observa que la mayor parte del año se supera el límite tolerable de ΔHR diaria ± 10 % HR. Se comprueba que, al igual que sucedía con la temperatura, las mayores oscilaciones tienen lugar en los meses estivales. En las oscilaciones estacionales, el requisito recomendado de ΔHR inferior a ± 20 % en ciclo estacional tampoco se cumple, como se ilustraba en la figura 8.14, donde se representaba la media mensual de HR en los años 2021 y 2022.

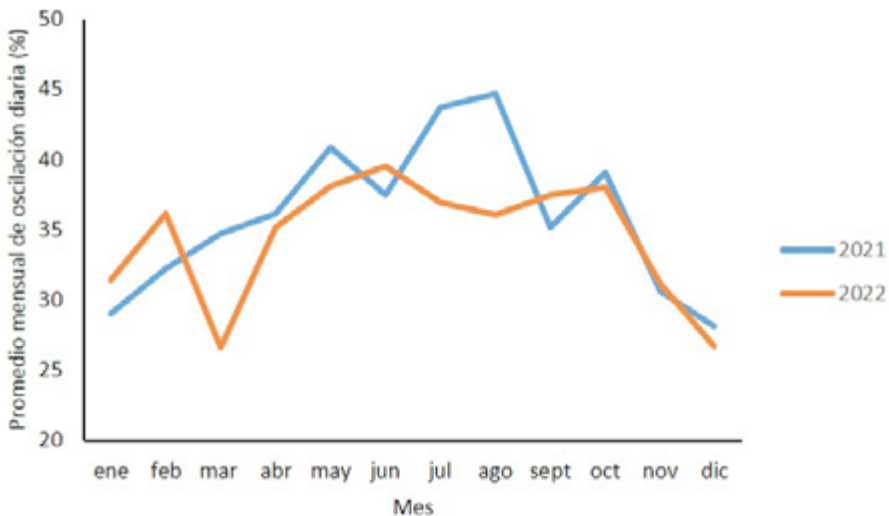


Figura 8.32. Promedio mensual de oscilación diaria de HR.

La figura 8.33 muestra dos gráficas representando el número de días en los que se registró una oscilación diaria de HR por debajo de un determinado valor a lo largo de los años 2021 y 2022. La intersección de las líneas de trazo discontinuo con el eje de abscisas indica el número de días al año en los que el valor de oscilación diaria de HR fue superior al tolerable diario ($\Delta HR: \pm 10\%$) y al tolerable estacional ($\Delta HR: \pm 20\%$). Al igual que sucede con la temperatura, se comprueba que la mayor parte de días del año se superó el valor máximo admisible para las oscilaciones de HR.

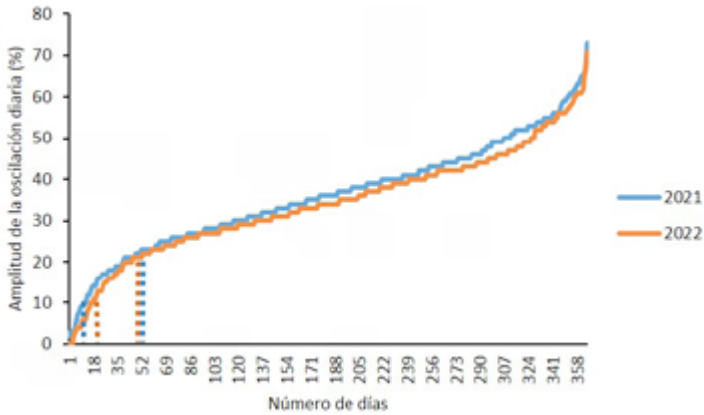


Figura 8.33. Grafica mostrando el número de días con oscilación diaria de HR por debajo de un cierto valor.

En cuanto a los niveles de contaminantes atmosféricos, los valores de concentración en aire de SO_2 , que no han excedido los $7 \mu g m^{-3}$, los de NO_2 , en el rango $1-25 \mu g m^{-3}$ y los de PM_{10} en el rango $10-30 \mu g m^{-3}$ ² sitúan a Alcoi en la categoría C2 de corrosividades según la norma UNE-EN ISO 9223:2012 (tabla 6.20).

En la tabla 8.8 se listan las tasas anuales de tiempo en que los niveles de contaminantes atmosféricos superaron los valores aceptables en conservación del patrimonio en interiores y lugares resguardados durante 2021 y 2022. Según los registros obtenidos, NO_2 y O_3 superaron el valor tolerable fijado por el Ministerio de Cultura un cierto número de días, destacando el O_3 que rebasó significativamente el límite de concentración aceptable en la práctica totalidad de ambas anualidades. Ello implica que este contaminante puede tener repercusión en la corrosión de patrimonio ferroviario conservado al aire libre y en lugares poco aislados del exterior.

Tabla 8.8. Tasa anual de tiempo en que los niveles de contaminantes atmosféricos superan los valores aceptables en conservación del patrimonio en interiores y lugares resguardados ³.

Año	Número de días al año con concentraciones superiores a las tolerables en el interior de edificios y lugares resguardados				
	SO_2	NO_2	O_3	PM_{10}	PM_{10} <small>umbral de alerta</small>
2021	0	47	334	1	0
2022	0	43	359	0	0

² Solo en 11 y 15 días al año, registrados en 2021 y 2022, respectivamente, se superó el valor $30 \mu g m^{-3}$.

³ No se incluyen porcentajes anuales debido a la gran cantidad de días en los que no se obtuvieron registros.

8.3. Valencia

8.3.1. Meteorología

Las figuras 8.34 a 8.37 muestran las gráficas de temperatura media, máxima y mínima diaria registrada en el campus de la UPV en Valencia en los años 2021 y 2022.

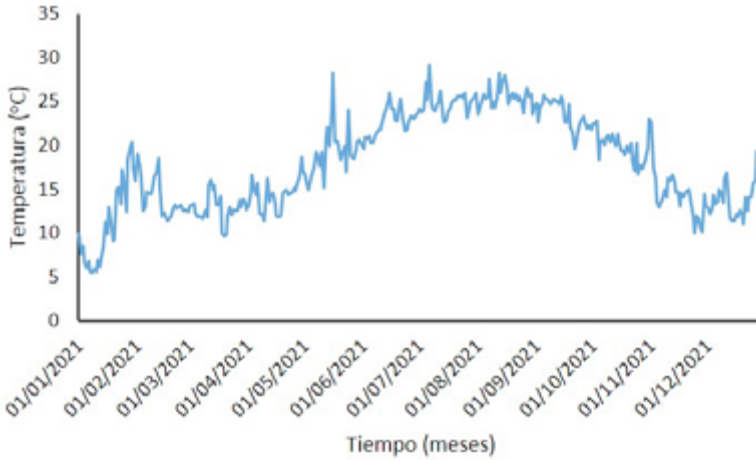


Figura 8.34. Variación de la temperatura diaria media en Valencia en el año 2021.

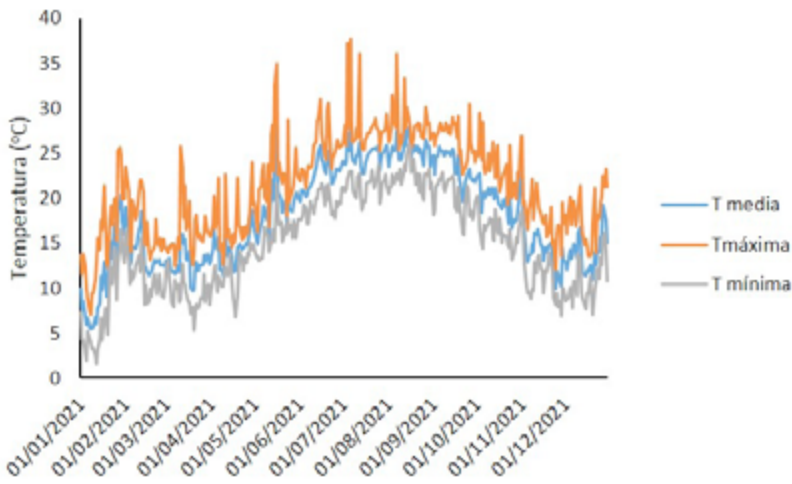


Figura 8.35. Variación de la temperatura diaria media, máxima y mínima en Valencia en el año 2021.

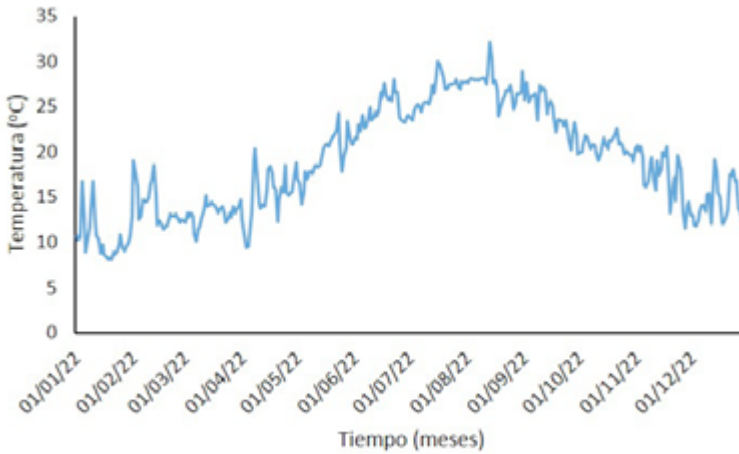


Figura 8.36. Variación de la temperatura diaria media en Valencia en el año 2022.

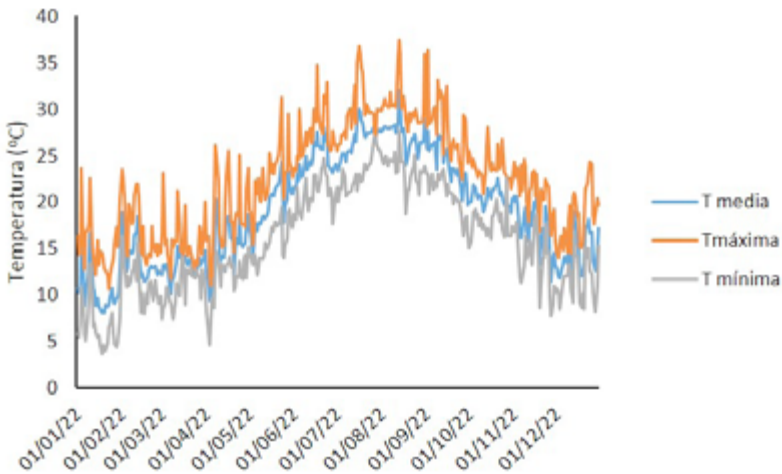


Figura 8.37. Variación de la temperatura diaria media, máxima y mínima en Valencia en el año 2022.

En las figuras 8.34 y 8.36 se aprecian fluctuaciones de la temperatura media diaria en forma de ciclos cortos irregulares de varios días que llegan a tener una amplitud de hasta 18 °C. Sobreimpuestas a los ciclos cortos se observan las tendencias crecientes y decrecientes estacionales. Los extremos de temperatura máxima y mínima diarios se presentan en las figuras 8.35 y 8.37. El examen detenido de estas, muestra que las fluctuaciones térmicas de las temperaturas máxima y mínima diaria en los ciclos cortos tienen mayor amplitud que las correspondientes a los valores de temperatura media.

Las figuras 8.38 a 8.41 muestran las curvas de variación de la HR media, máxima y mínima diaria a lo largo de los años 2021 y 2022.

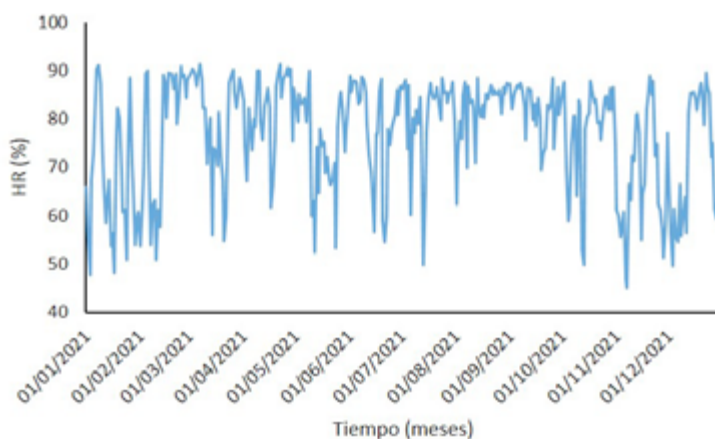


Figura 8.38. Variación de la humedad relativa diaria media en Valencia en el año 2021.

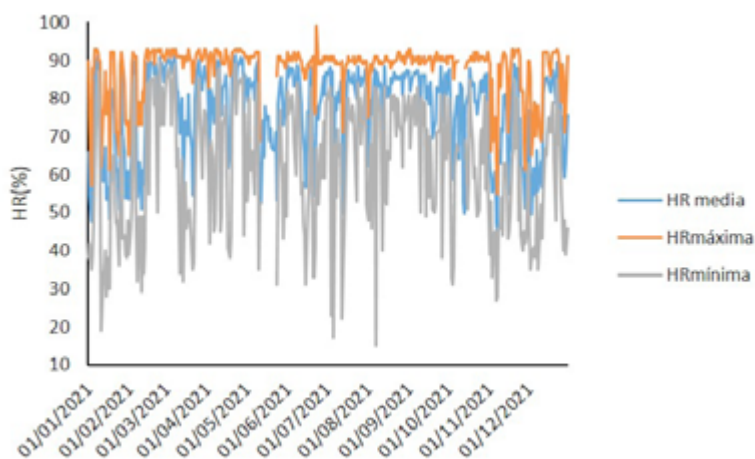


Figura 8.39. Variación de la HR diaria media, máxima y mínima en Valencia en el año 2021.

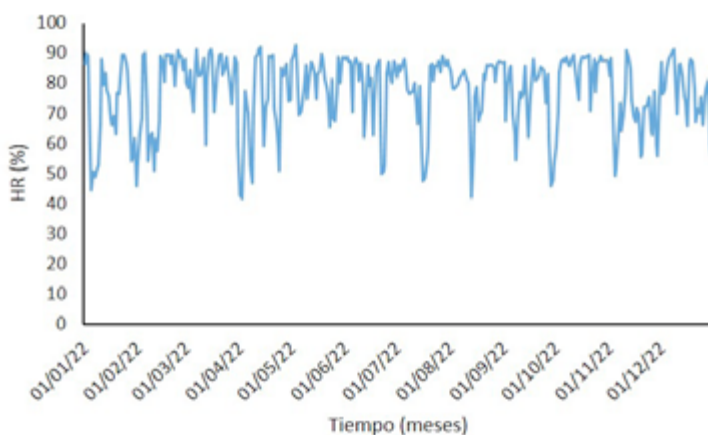


Figura 8.40. Variación de la humedad relativa diaria media en Valencia en el año 2022.

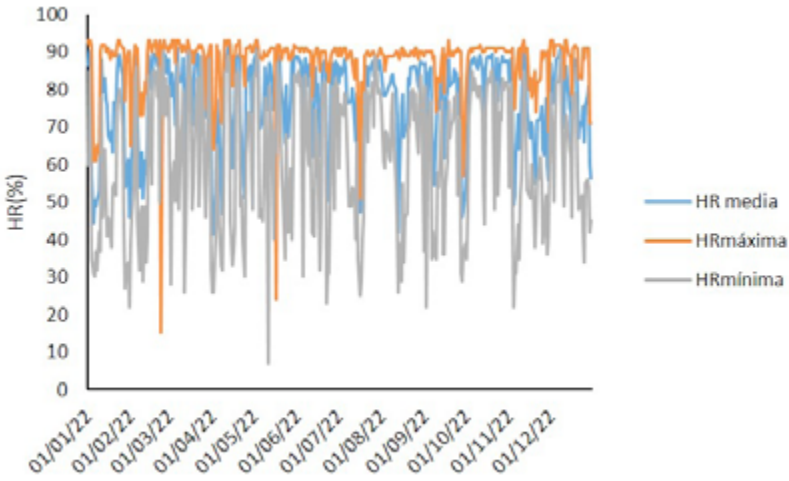


Figura 8.41. Variación de la HR diaria media, máxima y mínima en Valencia en el año 2022.

Al igual que la temperatura, la HR media diaria experimenta fluctuaciones irregulares que oscilan entre 4 y 8 días, alcanzando amplitudes del 40 % (figuras 8.38 y 8.40). Las HR máxima y mínima, que se presentan en las figuras 8.39 y 8.41, muestran las mismas oscilaciones cíclicas irregulares y las mismas tendencias estacionales que los valores medios de HR. Las fluctuaciones cíclicas irregulares pueden llegar a alcanzar amplitudes de hasta 75 unidades porcentuales para la HR mínima diaria.

Las figuras 8.42 y 8.43 muestran los valores de precipitación acumulada diariamente, durante los años 2021 y 2022, en Valencia. Los ciclos de lluvias son cortos, dos o tres días máximo y la intensidad de las precipitaciones no supera los 60 mm día⁻¹.

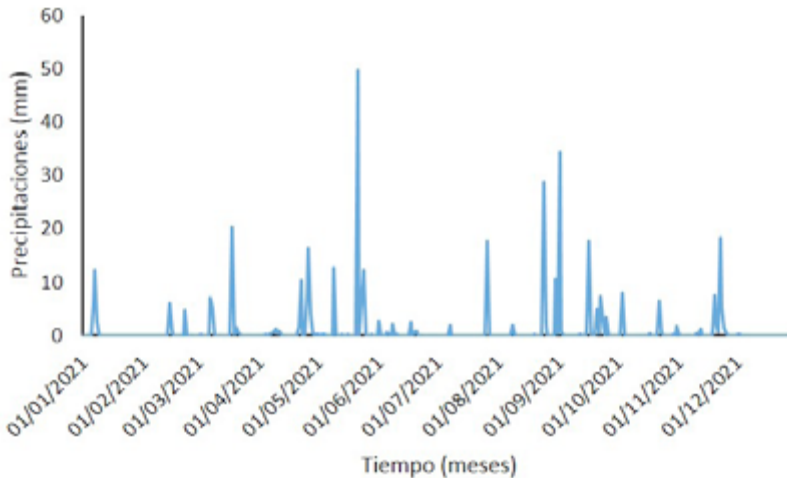


Figura 8.42. Variación de las precipitaciones en Valencia en 2021.

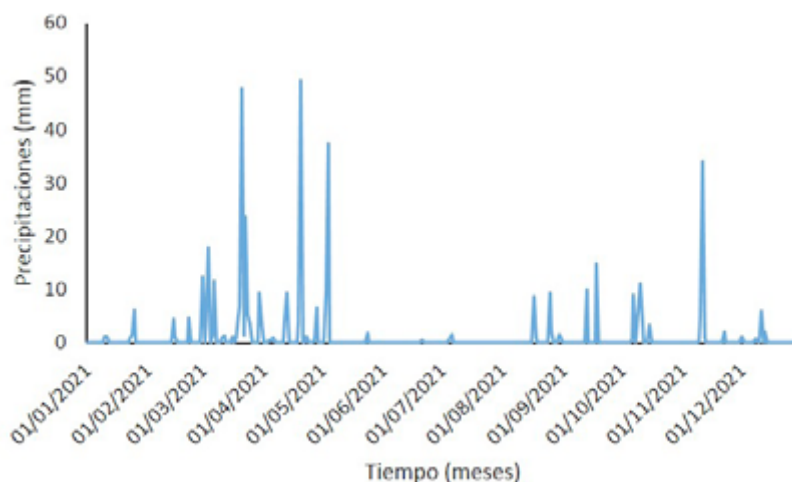


Figura 8.43. Variación de las precipitaciones en Valencia en 2022.

Los valores medios mensuales de temperatura y humedad relativa y los acumulados de precipitación mensual registrados en Valencia durante los años 2021 y 2022 se resumen en las tablas 8.9 y 8.10.

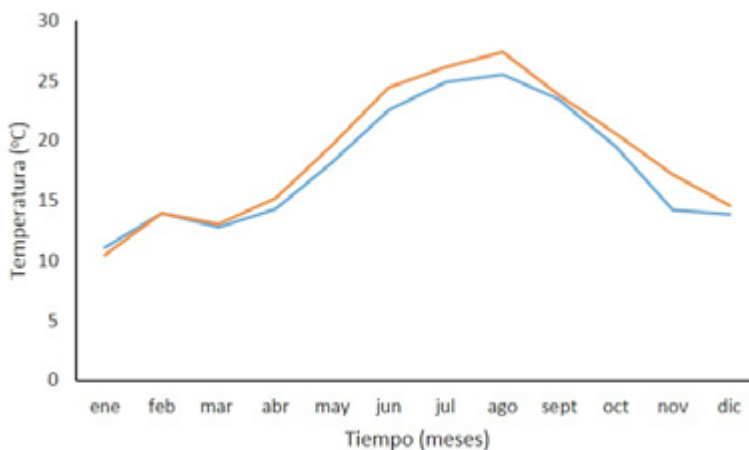
Tabla 8.9. Valores medios mensuales de variables meteorológicas registrados en Valencia en 2021. T (°C), HR (%), Precipitación (mm).

Mes	Valores mensuales						Precipitación
	T _{media}	T _{mínima}	T _{máxima}	HR _{media}	HR _{mínima}	HR _{máxima}	
Enero	11,1	1,6	25,6	64,7	28,0	93,0	22,2
Febrero	13,9	8,0	23,5	77,1	29,0	93,0	13,9
Marzo	12,8	5,0	25,5	80,2	32,0	93,0	44,7
Abril	14,3	6,8	24,0	81,8	38,0	93,0	48,8
Mayo	18,2	13,0	28,7	80,0	31,0	92,0	18,2
Junio	22,6	17,1	31,0	78,6	31,0	92,0	18,3
Julio	24,9	18,7	37,7	81,0	17,0	91,0	19,5
Agosto	25,5	19,8	36,1	82,4	15,0	92,0	43,9
Septiembre	23,5	15,9	30,5	82,3	38,0	93,0	73,3
Octubre	19,5	13,2	29,5	79,9	31,0	92,0	13,2
Noviembre	14,2	6,9	26,9	67,5	27,0	93,0	38,3
Diciembre	13,9	7,1	23,2	72,2	35,0	93,0	0,3

Tabla 8.10. Valores medios mensuales de variables meteorológicas registrados en Valencia en 2022. T (°C), HR (%), Precipitación (mm).

Mes	Valores mensuales						
	T _{media}	T _{mínima}	T _{máxima}	HR _{media}	HR _{mínima}	HR _{máxima}	Precipitación
Enero	10,5	3,7	23,6	70,6	22,0	93,0	9,4
Febrero	13,9	8,0	23,5	77,1	29,0	93,0	11,8
Marzo	13,0	7,4	23,2	81,0	26,0	93,0	64,3
Abril	15,2	4,6	26,1	72,3	26,0	93,0	77,7
Mayo	19,6	12,2	31,3	80,0	35,0	93,0	49,5
Junio	24,4	17,7	34,7	79,2	23,0	91,0	0,6
Julio	26,2	20,0	32,6	81,8	39,0	91,0	2,5
Agosto	27,4	18,7	37,5	78,3	26,0	91,0	23,3
Septiembre	23,8	16,4	36,4	74,2	22,0	93,0	30,3
Octubre	20,6	15,0	28,1	84,3	35,0	92,0	37,3
Noviembre	17,2	7,7	24,6	69,5	22,0	93,0	40,3
Diciembre	14,6	8,2	24,3	77,5	30,0	93,0	10,6

Las tendencias estacionales de las variables meteorológicas durante los años 2021 y 2022 se muestran en las figuras 8.44 a 8.46. Se constata una tendencia creciente de temperaturas que se inicia en enero, con un ligero descenso en marzo, y se extiende hasta agosto, mes en el que se alcanza el máximo anual, a partir del cual, se invierte la tendencia con el progresivo descenso de las temperaturas hasta noviembre. Siguiendo el ciclo estacional de climas templados, la temperatura media mensual se mantiene por debajo de los 15 °C desde noviembre hasta marzo (invierno), entre 15 y 20 °C en abril, mayo (primavera) y octubre (otoño) y supera los 20 °C en los meses de junio, julio, agosto y septiembre (primavera, verano) (figura 8.44).

**Figura 8.44.** Variación del promedio mensual de temperatura diaria en Valencia en 2021 y 2022.

La variación de la HR media mensual se muestra en la figura 8.45. En primer lugar, se comprueba que el promedio mensual de HR diaria en ambos años permanece en un rango relativamente estrecho comprendido entre 65 % y 84 %, durante todo el año. Sin embargo, se observa que las curvas obtenidas para ambos años presentan perfiles diferentes. En 2021 la curva se caracteriza por presentar valores bastante homogéneos desde febrero hasta octubre en una estrecha horquilla de 72-84 % con un descenso a valores del 65 % en los restantes meses de otoño e invierno. El año 2022 presenta un perfil mucho más irregular de variación mensual, con varios máximos por encima de 80 % en marzo, mayo, julio y octubre y mínimos por debajo de 75 % en abril, septiembre y noviembre.

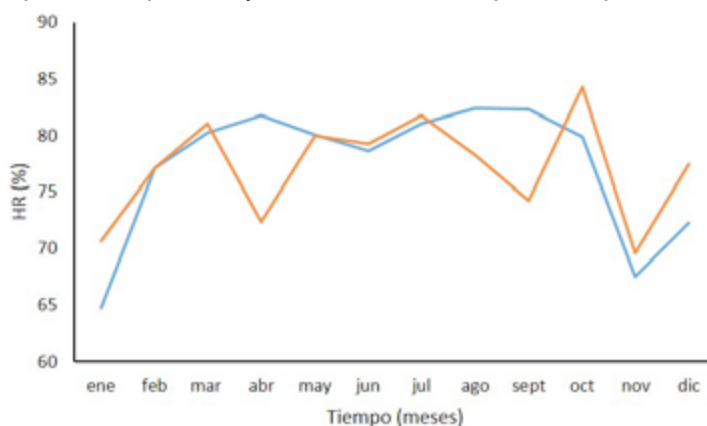


Figura 8.45 Variación del promedio mensual de HR diaria en Valencia en 2021 y 2022.

La figura 8.46 muestra la variación de las precipitaciones mensuales medias en Valencia en 2021 y 2022. Esta población se caracteriza por la menor tasa anual de precipitaciones en comparación con las otras dos localidades estudiadas. Las tendencias estacionales se caracterizan por un notable aumento de las precipitaciones en los periodos de primavera y otoño, llegándose a acumular en un mes valores de 48,8 y 73,3 mm en 2021 y 77,7 y 37,3 mm en 2022. No se ha hallado correlación entre los valores medios de HR mensual y la precipitación acumulada.

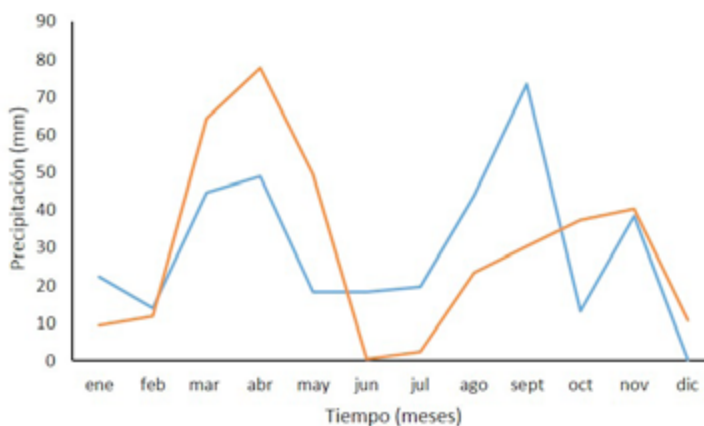


Figura 8.46. Variación del promedio mensual de precipitación diaria en Valencia en 2021 y 2022.

La tabla 8.11 sintetiza los parámetros estadísticos calculados para las variables meteorológicas. Los promedios anuales de temperatura diaria media son 17,4 y 14,8 °C en 2021 y 2022, respectivamente, con valores máximos de 37,7 y 32,1 °C y mínimos de 1,6 y 3,7 °C. Las oscilaciones térmicas diarias no superan los 18 °C. La dispersión de los valores de temperatura media diaria, dada por el error relativo estándar, está en torno al 30 %, sin clara tendencia de los valores a situarse por debajo o por encima del valor medio anual a tenor del pequeño valor absoluto del coeficiente de asimetría de Fisher. La HR media anual es de 77 % en ambos años, valor bastante acorde con una localización costera. Los valores máximo y mínimo de HR media diaria son 99 y 15 %, en 2021 y 93 y 15 % en 2022 y las amplitudes de HR diaria del 76 % en 2021 y 86 % en 2022. La dispersión de los valores medios diarios de HR, estimada a partir de la desviación estándar y el error relativo estándar, se establece en valores de 15 % en 2021 y 16 % en 2022. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado para 2021 es -0,9 y -1,0 para 2022, lo que pone de manifiesto la tendencia de la HR diaria media a situarse por debajo de la media anual. Por otra parte, los TOW reportados para ambas anualidades son 90 y 83 días. Cabe resaltar que, pese a que en 2022 el número de días en los que se registraron lluvias fue menor que en 2021, la cantidad de agua caída fue superior, lo que es indicativo de que los fenómenos tormentosos fueron ligeramente más intensos en 2022.

Tabla 8.11. Parámetros estadísticos de variables meteorológicas en Valencia.

Año	Valor máximo anual	Valor mínimo anual	Amplitud anual máxima	Valor medio	Desviación estándar	Error relativo estándar	Coficiente de asimetría de Fisher
Temperatura (°C)							
2021	37,7	1,6	17,4	18	6	30	-0,1
2022	32,1	3,7	14,8	19	6	31	0,1
Humedad Relativa (%)							
2021	99	15	76	77	11	15	-0,9
2022	93	15	83	77	12	16	-1
Precipitación	TOW (días)	Máximo diario anual (mm)		Total anual acumulado (mm)			
2021	90	49,7		396,4			
2022	83	49,2		449,8			

8.3.2. Calidad del aire

Las figuras 8.47 a 8.57 muestran la variación de los niveles medios diarios de contaminantes SO₂, NO₂, O₃, PM2,5 y PM10 en Valencia durante los años 2021 y 2022.

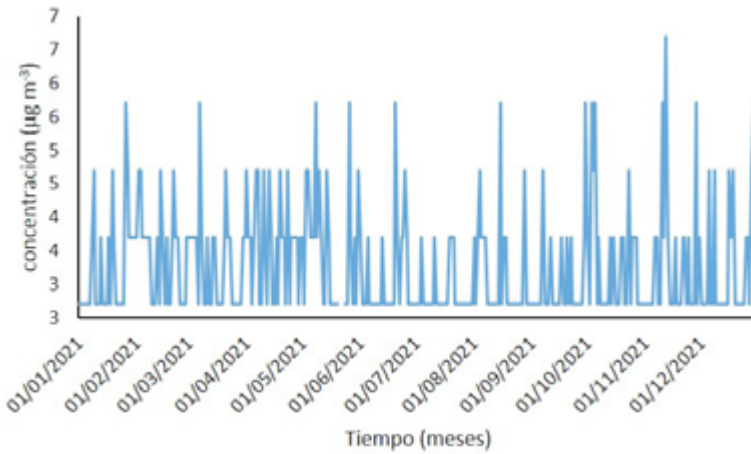


Figura 8.47. Variación del nivel medio diario de SO₂, en aire en el año 2021.

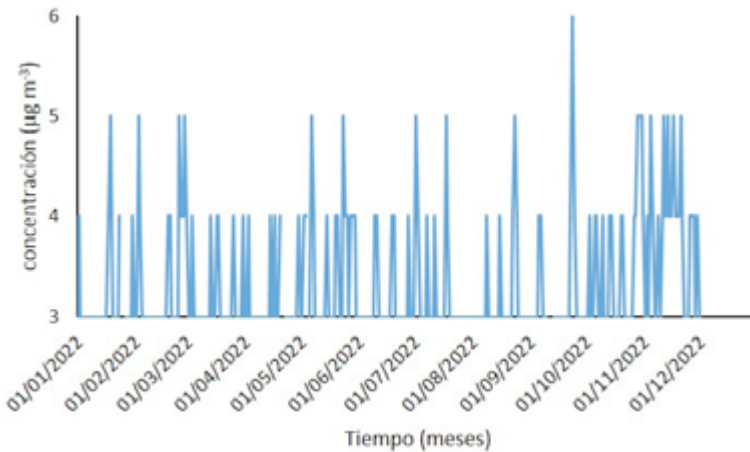


Figura 8.48. Variación del nivel medio diario de SO₂, en aire en 2022.

Estos valores bajos de contaminación atmosférica indican que el denso tráfico y la industrialización del cinturón de la ciudad de Valencia no parecen estar contribuyendo de manera apreciable a la emisión de este GEI. Consecuentemente, este contaminante presenta poca variación diaria y estacional y sus fluctuaciones son consideradas aleatorias.

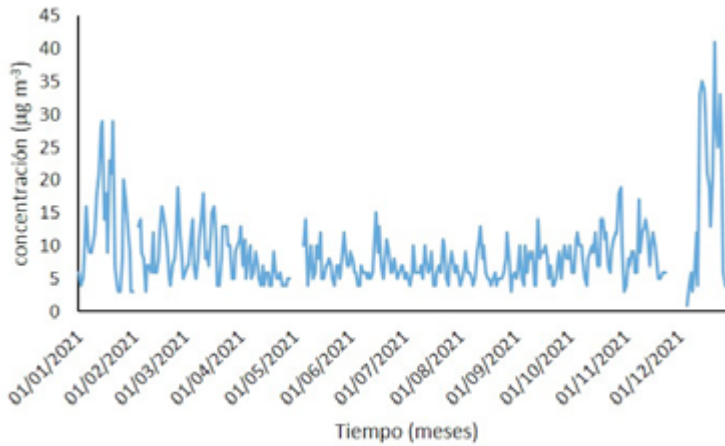


Figura 8.49. Variación del nivel medio diario de NO₂, en aire en 2021.

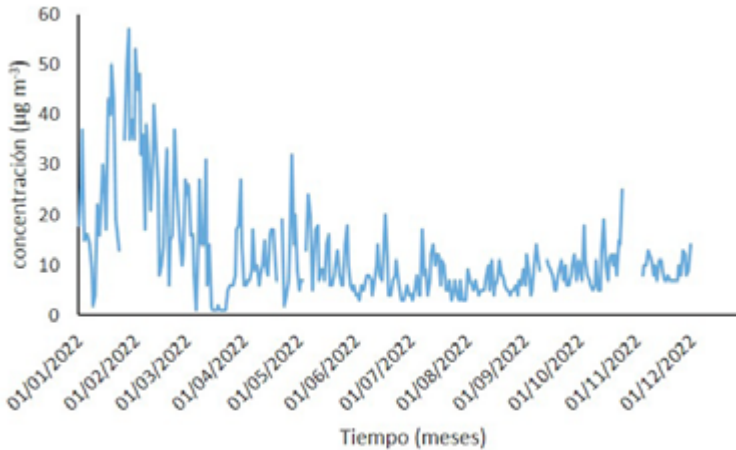


Figura 8.50. Variación del nivel medio diario de NO₂, en aire en 2022.

Los registros diarios de concentración de NO₂ en Valencia muestran una tendencia estacional con máximos en enero y febrero y progresiva reducción de los valores diarios del invierno a la primavera y de esta al verano, y el progresivo aumento en la transición del otoño al invierno en ambos años (figuras 8.49 y 8.50).

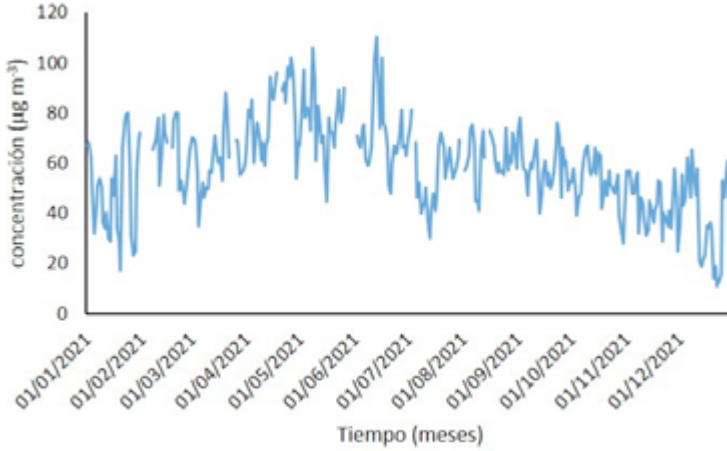


Figura 8.51. Variación del nivel medio diario de O₃, en aire en 2021.

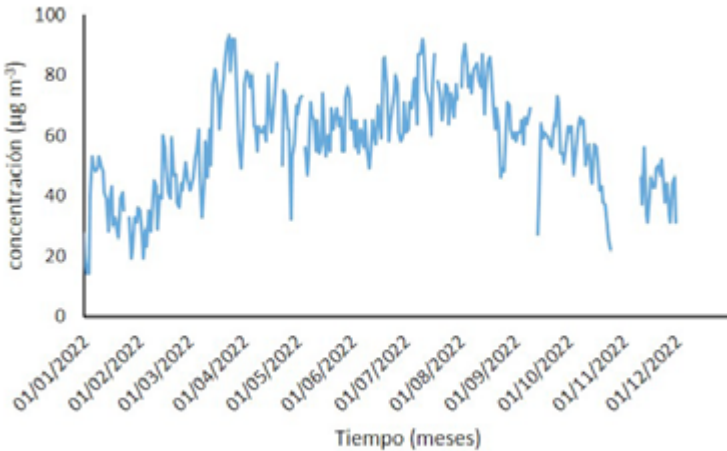


Figura 8.52. Variación del nivel medio diario de O₃, en aire en 2022.

En las figuras 8.51 y 8.52 se aprecian fluctuaciones cortas, de tres o cuatro días, en las que la concentración de ozono puede variar del orden de 50 µg m⁻³. También se observa una variación estacional que exhibe los valores más elevados en primavera y verano y los valores más bajos en otoño e invierno. Como ya se mencionó en la discusión de resultados obtenidos en Alcoi, el factor determinante de este aumento de la concentración en los períodos de primavera y verano es el incremento de la intensidad de la luz solar y el mayor número de horas con insolación. La variación estacional de la concentración de O₃ también se puede correlacionar, en primera aproximación con las mayores temperaturas registradas en estas estaciones, como pone de manifiesto la gráfica de dispersión de la figura 8.53 en la que se aprecia una cierta tendencia a incrementar los valores de concentración de O₃

con la temperatura. Los coeficientes de correlación calculados para 2021 y 2022 son 0,21 y 0,53, respectivamente. No se ha hallado correlación con la concentración de NO_2 , reactivo implicado en la formación de ozono a nivel del suelo, ya que el NO_2 muestra sus valores máximos en las estaciones frías.

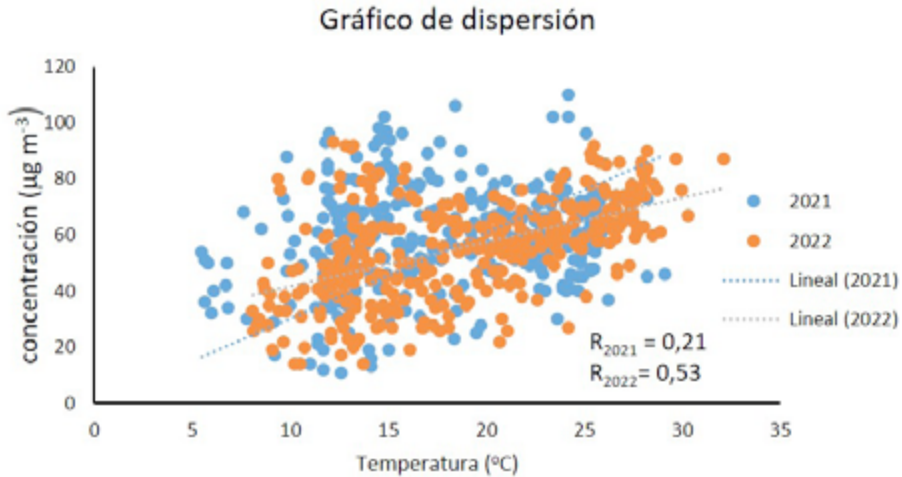


Figura 8.53. Gráfico de regresión de la variable concentración de O_3 frente la temperatura. R_{2021} y R_{2022} : coeficientes de regresión correspondientes a los años 2021 y 2022.

En las figuras 8.54 y 8.55 se observan fluctuaciones cortas, de tres o cuatro días, en las que la concentración de $\text{PM}_{2,5}$ puede llegar a variar del orden de $40 \mu\text{g m}^{-3}$. No se aprecia variación estacional.

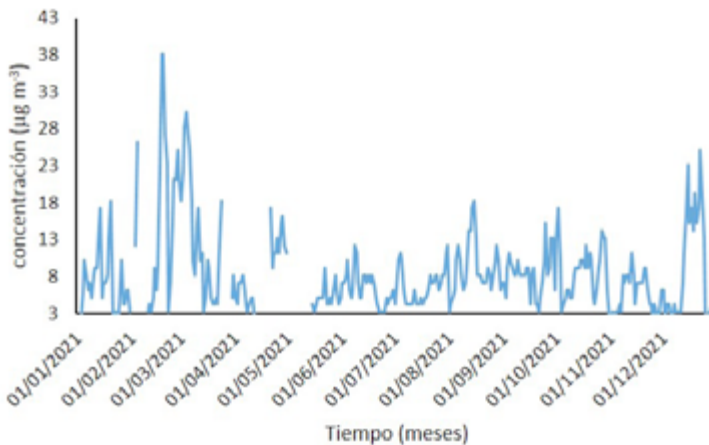


Figura 8.54. Variación del nivel medio diario de $\text{MP}_{2.5}$, en aire en 2021.

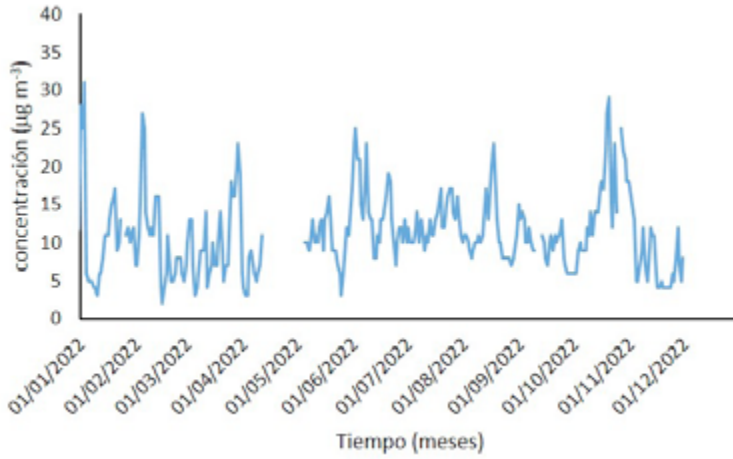


Figura 8.55. Variación del nivel medio diario de PM_{2,5}, en aire en 2022.

En las figuras 8.56 y 8.57 se observan fluctuaciones cortas, de tres o cuatro días, en las que la concentración de PM₁₀ puede variar del orden de 40 $\mu\text{g m}^{-3}$. No se aprecia variación estacional.

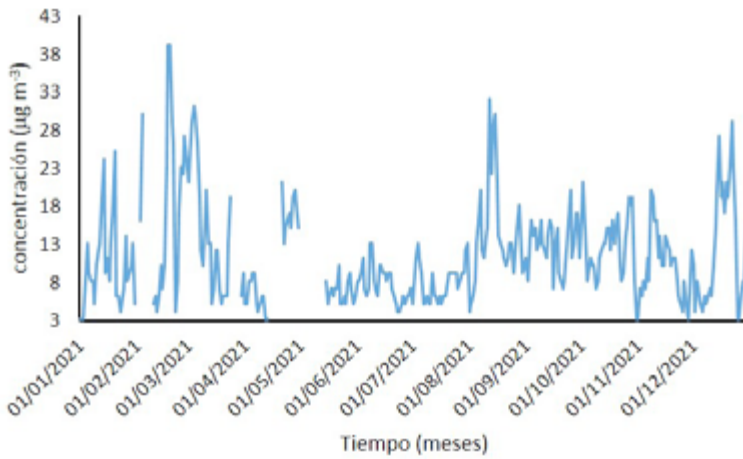


Figura 8.56. Variación del nivel medio diario de PM₁₀, en aire en 2021.

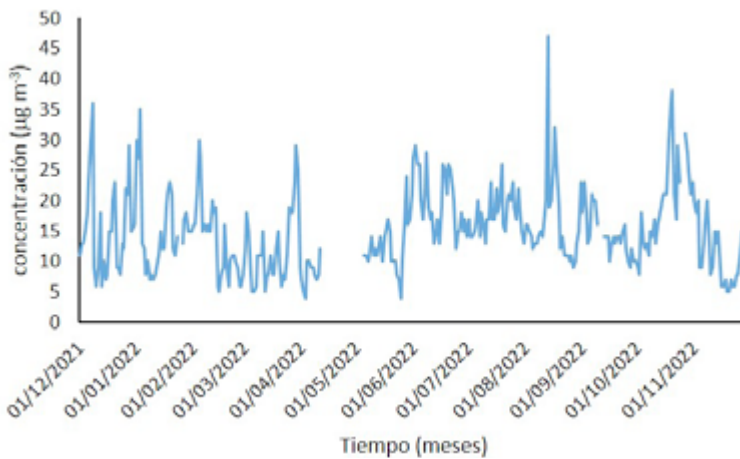


Figura 8.57. Variación del nivel medio diario de PM10, en aire en 2022.

En la tabla 8.12 se resumen los parámetros estadísticos obtenidos para los registros de variables de calidad del aire en los años 2021 y 2022 en la ciudad de Valencia.

Tabla 8.12. Parámetros estadísticos.

Año	Valor máximo anual	Valor mínimo	Valor medio	Desviación estándar	Error relativo estándar	Coefficiente de asimetría de Fisher
Nivel de SO₂ (mg m⁻³)						
2021	7	3	3,6	0,8	23	1,5
2022	6	3	3,4	0,8	17	1,5
Nivel de NO₂ (mg m⁻³)						
2021	41	1	9,1	6	66	2,4
2022	57	1	12,1	10	82	2
Nivel de O₃ (mg m⁻³)						
2021	110	11	58,6	18	30	-0,1
2022	93	14	58,6	18	32	-0,2
PM2,5 (mg m⁻³)						
2021	38	2	8,4	6	69	2
2022	34	2	11,3	5	47	1,2
PM10 (mg m⁻³)						
2021	39	3	11,4	7	57	1,3
2022	47	4	15,1	7	44	1

La concentración media diaria de SO₂ en 2021 fue 3,6 µg m⁻³, siendo el valor más bajo a lo largo del año 3 µg m⁻³ y el más elevado, registrado en el mes de diciembre, 7 µg m⁻³.

La concentración media de SO_2 en 2022 fue $3,4 \mu\text{g m}^{-3}$, siendo el valor más bajo registrado $3 \mu\text{g m}^{-3}$ y el más elevado $6 \mu\text{g m}^{-3}$. La dispersión de valores medios diarios, calculada a partir de la desviación estándar y el error relativo estándar, se establece en valores de 0,8 y 23 % en 2021 y 0,8 y 17 % en 2022. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado para ambos años fue 1,5, lo que pone de manifiesto la tendencia clara de los valores a situarse por encima de la media en los dos años.

El valor de la concentración media diaria de NO_2 en 2021 fue $9,1 \mu\text{g m}^{-3}$, acompañado de máximos y mínimos anuales de $41 \mu\text{g m}^{-3}$ y $1 \mu\text{g m}^{-3}$. En 2022 el valor medio fue $12,1 \mu\text{g m}^{-3}$ con máximo y mínimo de 57 y $1 \mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente (tabla 8.6). La dispersión de valores medios diarios, calculada a partir de la desviación estándar y el error relativo estándar, se sitúa en valores de 6 y 66 % en 2021 y 10 y 82 % en 2022. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado para 2021 es 2,4 y 2 para 2022, lo que pone de manifiesto el carácter netamente positivo de la distribución de valores en ambos años.

El contaminante ozono es el que ha mostrado valores más elevados de los cinco considerados en este estudio. La concentración media diaria de O_3 en 2021 fue $58,6 \mu\text{g m}^{-3}$, siendo el valor más bajo registrado a lo largo del año $11 \mu\text{g m}^{-3}$ y el más elevado, $110 \mu\text{g m}^{-3}$. La concentración media de O_3 en 2022 fue $58,6 \mu\text{g m}^{-3}$, siendo el valor más bajo registrado $14 \mu\text{g m}^{-3}$ y el más elevado $93 \mu\text{g m}^{-3}$. La dispersión de valores medios diarios, calculada a partir de la desviación estándar y el error relativo estándar, se establece en valores de 18 y 30 % en 2021 y 18 y 32 % en 2022. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado para 2021 es $-0,1$ para 2021 y $-0,2$ para 2022, lo que muestra una tendencia negativa.

El contaminante $\text{PM}_{2,5}$ presenta una concentración media diaria de $8,4 \mu\text{g m}^{-3}$ en 2021, con un valor mínimo, a lo largo del año, de $2 \mu\text{g m}^{-3}$ y un máximo de $38 \mu\text{g m}^{-3}$. En 2022 la concentración media de $\text{PM}_{2,5}$ fue $11,3 \mu\text{g m}^{-3}$, siendo el valor más bajo registrado $2 \mu\text{g m}^{-3}$, y el más elevado $34 \mu\text{g m}^{-3}$. La dispersión de valores medios diarios, se sitúa en valores de 6 (69 %) en 2021 y 5 (47 %) en 2022 para la desviación estándar y el error relativo estándar, respectivamente. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado para 2021 es 2 y 1,2 para 2022, lo que muestra una clara tendencia hacia valores por encima de la media.

El contaminante PM_{10} ha mostrado valores de concentración en el aire más elevados que los registrados para $\text{PM}_{2,5}$. La concentración media diaria en 2021 fue $11,4 \mu\text{g m}^{-3}$, registrándose un valor mínimo, a lo largo del año, de $3 \mu\text{g m}^{-3}$ y un máximo de $39 \mu\text{g m}^{-3}$. En 2022 la concentración media de PM_{10} fue $15,1 \mu\text{g m}^{-3}$, siendo el valor más bajo registrado $4 \mu\text{g m}^{-3}$ y el más elevado $47 \mu\text{g m}^{-3}$. La dispersión de valores medios diarios, se establece en valores de 7 (57 %) en 2021 y 7 (44 %) en 2022 para la desviación estándar y el error relativo estándar, respectivamente. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado para 2021 es 1,3 para 2021 y 1,0 para 2022, lo que muestra una clara tendencia hacia valores por encima de la media.

Las tendencias estacionales de los agentes contaminantes atmosféricos en estudio pueden reconocerse mejor a partir de las gráficas de valores medios mensuales que se muestran en las figuras 8.58 a 8.62. Las curvas de la figura 8.58 evidencian la ausencia de tendencia estacional debido a los bajos niveles de concentración exhibidos por este contaminante.

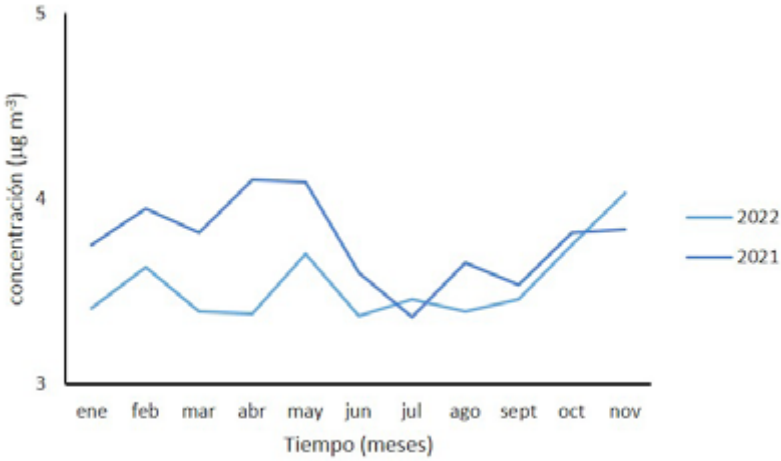


Figura 8.58. Variación de la concentración media mensual de SO₂ en Valencia en 2021 y 2022.

Las gráficas de la figura 8.59 confirman el incremento de los valores de concentración de NO₂ en invierno, con progresivo descenso hasta el verano e inversión de la tendencia en otoño.

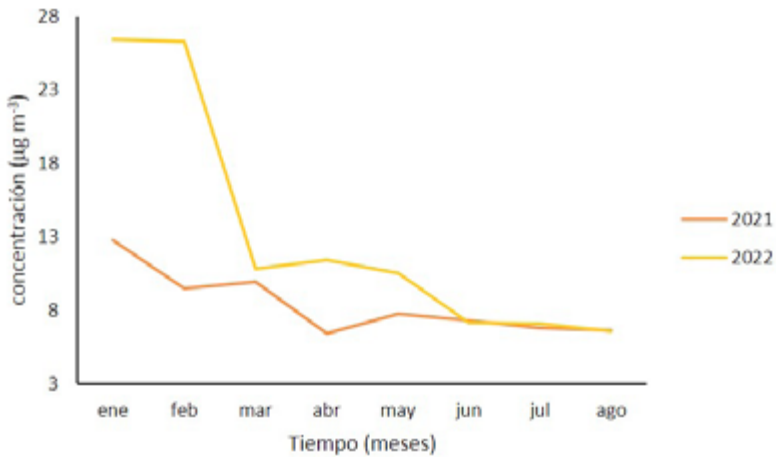


Figura 8.59. Variación de la concentración media mensual de NO₂ en Valencia en 2021 y 2022.

Las gráficas de la figura 8.60 ponen de manifiesto la clara tendencia de este contaminante a incrementar sus valores en primavera y verano, y reducirlos en las estaciones frías.

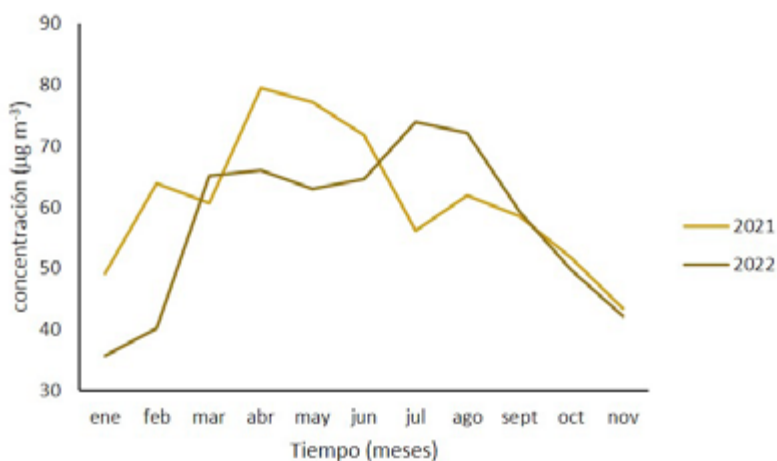


Figura 8.60. Variación de la concentración media mensual de O₃ en Valencia en 2021 y 2022.

Las gráficas de la figura 8.61 ponen de manifiesto la ausencia de tendencia estacional de este contaminante que presenta un patrón de ciclos irregulares de varios meses de duración.

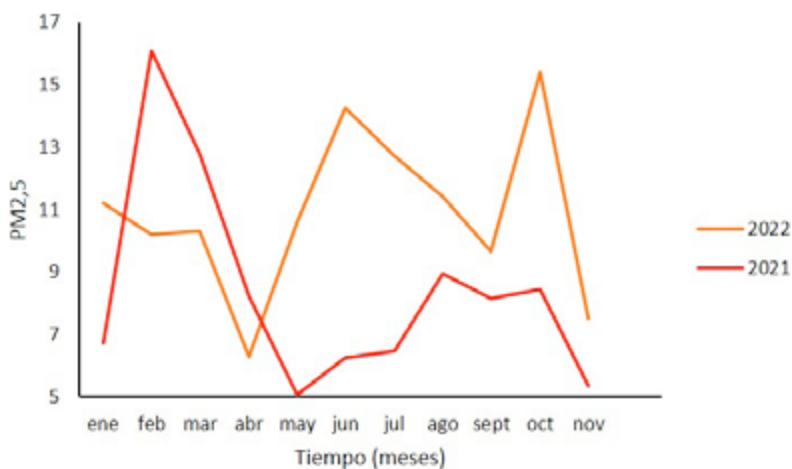


Figura 8.61. Variación de la concentración media mensual de PM_{2,5} en Valencia en 2021 y 2022.

Las gráficas de la figura 8.62 sugieren, al igual que sucedía con el PM_{2,5}, ausencia de tendencia estacional definida para PM₁₀. Si se compara las gráficas de las figuras 8.61 y 8.62, se comprueba que el perfil de variación anual de ambas clases de partículas es muy similar en ambos años, exhibiendo valores muy próximos de concentración en el aire.

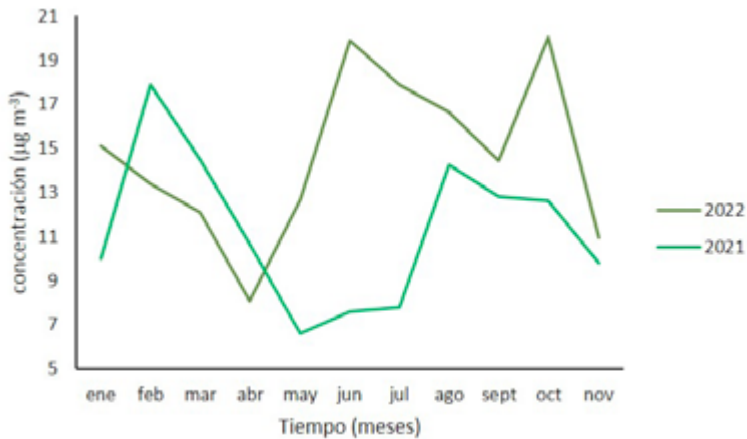


Figura 8.62. Variación de la concentración media mensual de PM10 en Valencia en 2021 y 2022.

8.3.3. Implicaciones en la conservación de patrimonio ferrotranviario

La tabla 8.13 resume el número de días y la tasa anual de tiempo, expresada en porcentaje (valores entre paréntesis), en que los valores medios de las variables meteorológicas registradas fueron superiores a los valores aceptables en conservación del patrimonio metálico. La temperatura se mantiene por encima del valor aceptable un número de días ligeramente inferior al 40 % del año en ambas anualidades. Ello implica que, durante más de un tercio del año, el clima de Valencia no sería muy apropiado para la conservación de patrimonio en metal. Como es propio de una ciudad costera, los valores de HR media diaria se mantienen todo el año por encima del umbral aceptable de 30 %, por lo que también son muy desfavorables para una adecuada conservación de bienes ferrotranviarios al aire libre o en interiores sin climatización. Por el contrario, los valores de TOW registrados son relativamente favorables al situarse en tasas anuales inferiores al 25 % en ambas anualidades.

Tabla 8.13. Tasa anual de tiempo en que los niveles de variables meteorológicas superan a los valores aceptables en conservación del patrimonio.

Año	Número de días al año sobrepasando el valor tolerable	Número de días al año sobrepasando el valor tolerable de oscilación diaria
Temperatura		
	T > 20 °C	ΔT > ±2-5 °C
2021	145 (39,7 %)	349 (95,6 %)
2022	142 (38,9 %)	352 (96,4 %)
HR		
	HR > 30 %	HR > 10 %
2021	365 (100 %)	345 (94,5 %)
2022	347 (95,1 %)	348 (95,3 %)
Precipitaciones		
	TOW	
2021	90 días (24,7 %)	
2022	83 días (22,7 %)	

En relación a las fluctuaciones de temperatura y HR, las figura 8.63 a 8.66 presentan las curvas de variación de los valores promedio mensuales de la oscilación diaria de temperatura y HR y la frecuencia de días con un determinado valor de oscilación diaria de temperatura y HR durante los años 2021 y 2022.

En relación a la temperatura, la figura 8.63 muestra que las oscilaciones térmicas diarias promediadas mensualmente se sitúan en una horquilla 5 a 9 °C. Se observa una tendencia estacional con un decrecimiento evidente de enero a marzo, siendo el mes de enero el que registra las mayores oscilaciones. El resto del año los valores de oscilación se acotan en un intervalo más estrecho de 5,5 a 7 °C.

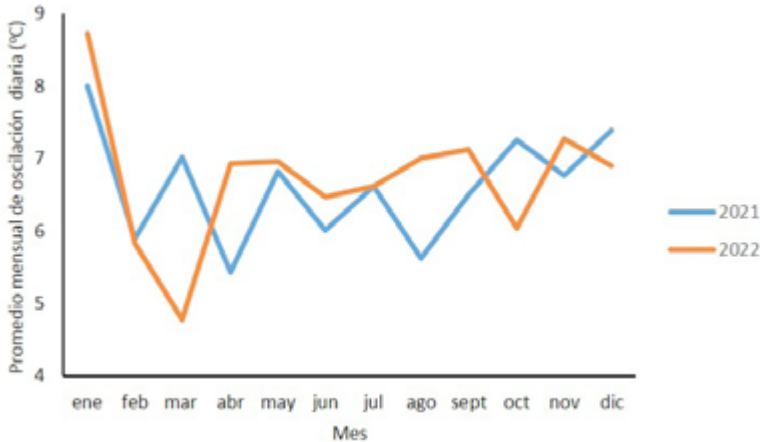


Figura 8.63. Promedio mensual de oscilación térmica diaria.

La figura 8.64 muestra que la mayoría del año en 2022 y más de dos tercios de 2021 se supera el límite tolerable para la oscilación térmica diaria de ± 5 °C, establecido por el Ministerio de Cultura (2009) para la conservación de objetos en el interior de edificios.

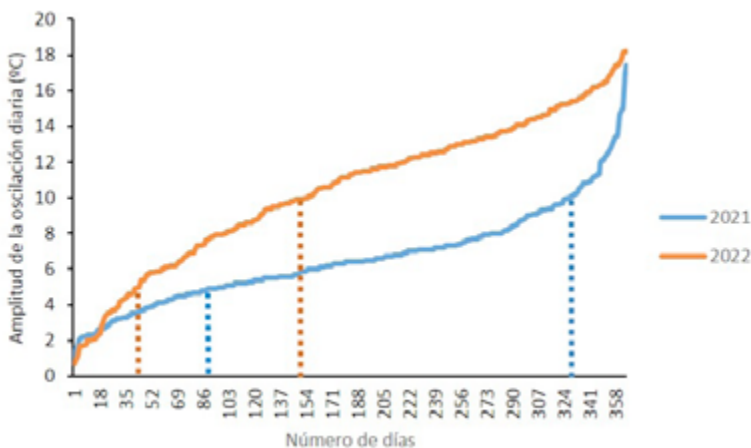


Figura 8.64. Grafica mostrando el número de días con oscilación diaria de temperatura por debajo de un cierto valor.

La figura 8.65 muestra que el intervalo de las oscilaciones diarias de HR promediadas cada mes durante los años 2021 y 2022 se establece entre 15-35 %. Al igual que sucedía con la oscilación térmica, las mayores oscilaciones de HR tienen lugar en el invierno. Tampoco en este caso se aprecia tendencia estacional alguna.



Figura 8.65. Promedio mensual de oscilación diaria de HR.

La figura 8.66 muestra que el número de días al año en los que se cumple la condición $\Delta HR \leq 10\%$ de variación diaria fue muy bajo en 2022, registrándose 86 días en los que el valor 10 % de ΔHR no fue rebasado durante 2021.

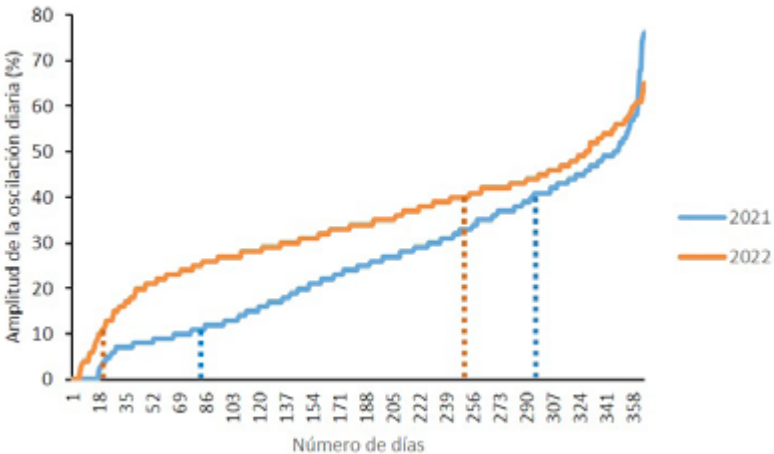


Figura 8.66. Grafica mostrando el número de días con oscilación diaria de HR por debajo de un cierto valor.

La tabla 8.14 muestra la tasa anual de tiempo en que los niveles de contaminantes atmosféricos superaron los valores aceptables. Se comprueba que las concentraciones de

SO₂, PM10, y PM2,5 consiguen permanecer inferiores al valor tolerable establecido para la conservación de objetos metálicos en el interior de edificios y lugares resguardados durante todo el año. De los otros dos contaminantes destaca el O₃ por superar el umbral de tolerancia casi todo el año. También se comprueba que en el año 2022 el número de días con superación de valor límite para NO₂ se incrementó significativamente con respecto a 2021.

Tabla 8.14. Tasa anual de tiempo en que los niveles de contaminantes atmosféricos superan los valores aceptables en conservación del patrimonio en interiores y lugares resguardados⁴.

Año	Número de días al año con concentraciones superiores a las tolerables						
	SO ₂	NO ₂	O ₃	PM2,5	PM2,5 umbral alerta	PM10	PM10 umbral alerta
2021	0	85	342	0	0	0	0
2022	0	123	339	0	0	0	0

Los valores medios obtenidos para el conjunto de contaminantes considerados en este estudio (tabla 8.12) permite clasificar a Valencia en la categoría C2-C3 de corrosividad de objetos metálicos conservados al aire libre (UNE-EN ISO 9223:2012) (tabla 6.20). Los valores reportados en Valencia, sin embargo, son ligeramente superiores a los registrados en Alcoi, lo que sumado a los mayores valores de HR, también reportados en Valencia, y a la mayor salinidad por ser ciudad costera, situarían esta población en la categoría C3.

8.4. Vilafranca del Cid

8.4.1. Meteorología

Las figuras 8.67 a 8.76 muestran la variación diaria y mensual de temperatura, humedad relativa y precipitaciones en Vilafranca del Cid a lo largo de 2021 y 2022. Los valores medios mensuales de temperatura y humedad relativa y los acumulados de precipitación mensual registrados en Vilafranca del Cid durante los años 2021 y 2022 se resumen en las tablas 8.16 y 8.17. En las figuras 8.67 y 8.69 se observan fluctuaciones de la temperatura media diaria en forma de ciclos irregulares, cuya duración oscila entre 4 y 8 días, con amplitudes se sitúan en torno a 10 °C. Sobreimpuestas a los ciclos cortos irregulares se aprecian las tendencias crecientes y decrecientes estacionales. Las temperaturas máxima y mínima, que se presentan en las figuras 8.68 y 8.70, muestran las mismas oscilaciones cíclicas irregulares y las mismas tendencias estacionales que los valores medios.

⁴ No se incluyen porcentajes anuales debido a la gran cantidad de días en los que no se obtuvieron registros.

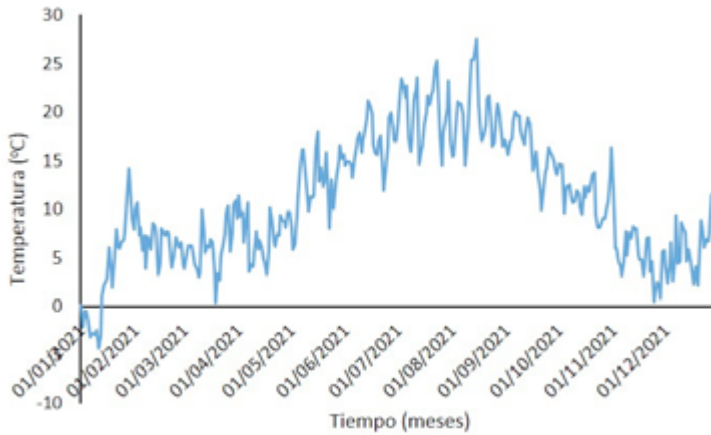


Figura 8.67. Variación de la temperatura diaria media en Vilafranca del Cid en el año 2021.

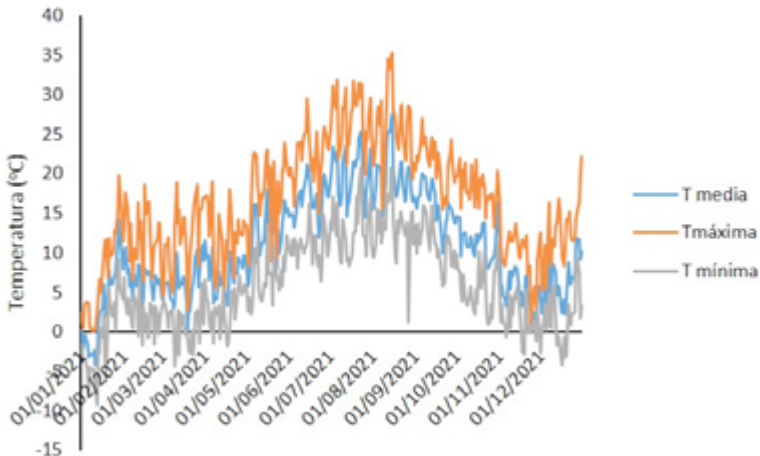


Figura 8.68. Variación de la temperatura diaria media, máxima y mínima en Vilafranca del Cid en el año 2021.

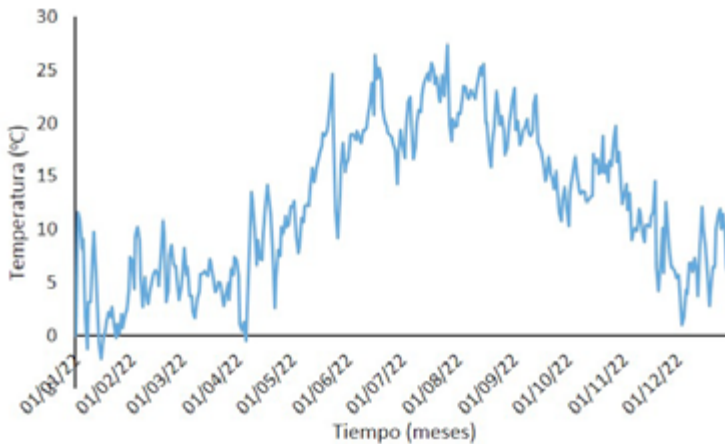


Figura 8.69. Variación de la temperatura diaria media en Vilafranca del Cid en el año 2022.

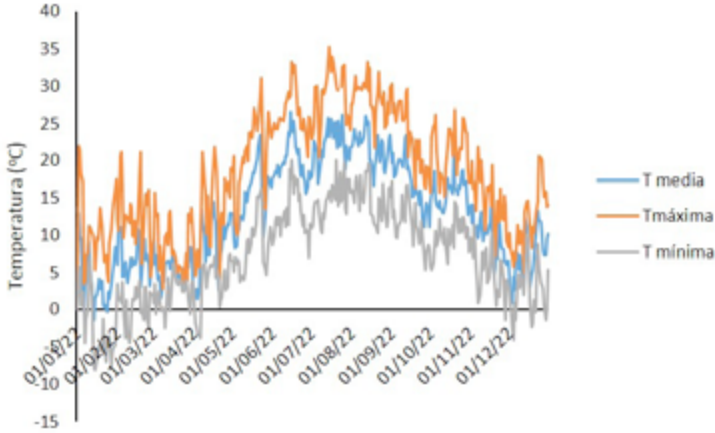


Figura 8.70. Variación de la temperatura diaria media, máxima y mínima en Vilafranca del Cid en el año 2022.

Las figuras 8.71 a 8.74 muestran las curvas de variación de la HR media, máxima y mínima diaria a lo largo de los años 2021 y 2022.

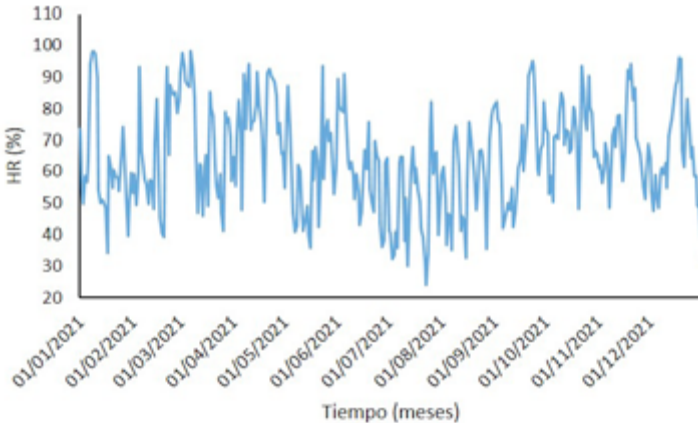


Figura 8.71. Variación de la humedad relativa diaria media en Vilafranca del Cid en el año 2021.

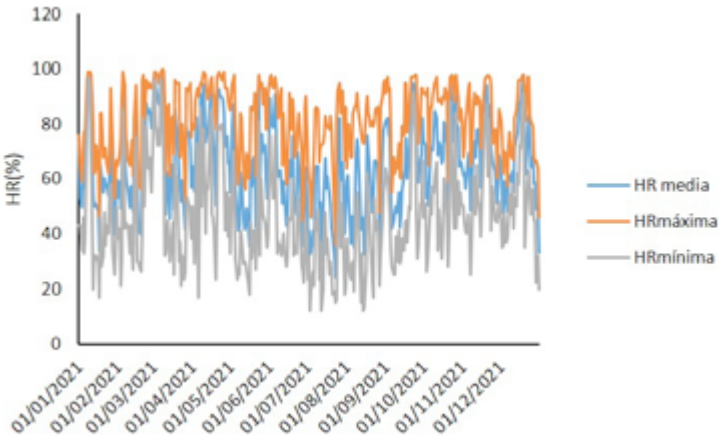


Figura 8.72. Variación de la HR diaria media, máxima y mínima en Vilafranca del Cid en el año 2021.

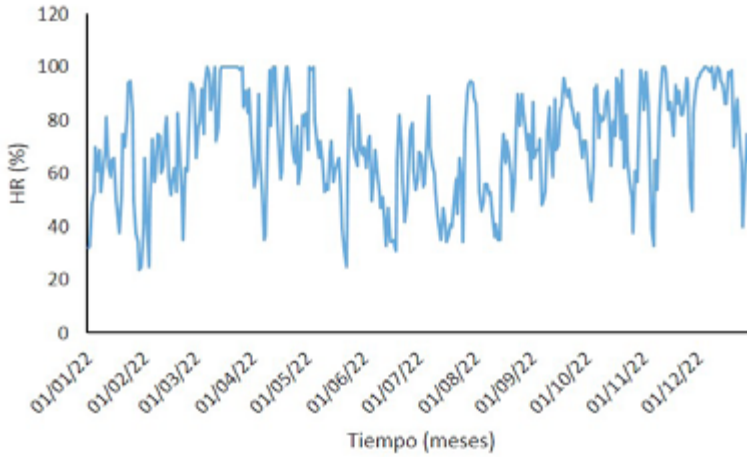


Figura 8.73. Variación de la humedad relativa diaria media en Vilafranca del Cid en el año 2022.

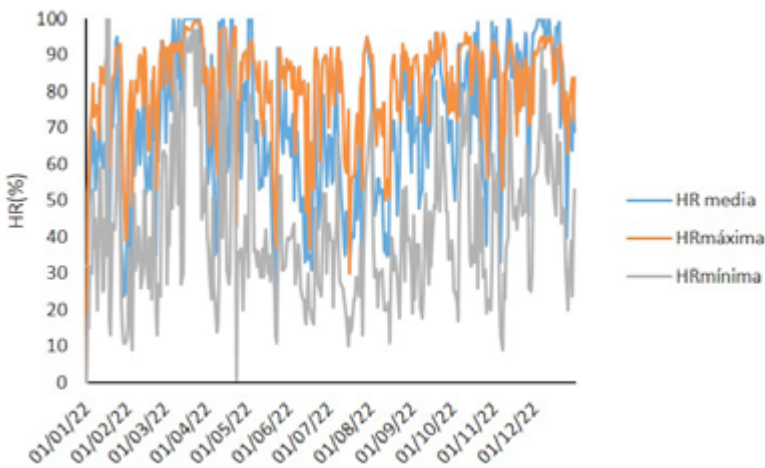


Figura 8.74. Variación de la HR diaria media, máxima y mínima en Vilafranca del Cid en el año 2022.

De modo similar a la temperatura, la HR experimenta fluctuaciones irregulares que oscilan entre 4 y 9 días de duración y alcanzan amplitudes alrededor de 80 unidades porcentuales. Las HR diarias máxima y mínima muestran las mismas oscilaciones cíclicas irregulares y las mismas tendencias estacionales que los valores medios (figuras 8.72 y 8.74).

Las figuras 8.75 y 8.76 muestran los valores diarios de precipitación reportados en los años 2021 y 2022, en Vilafranca del Cid.

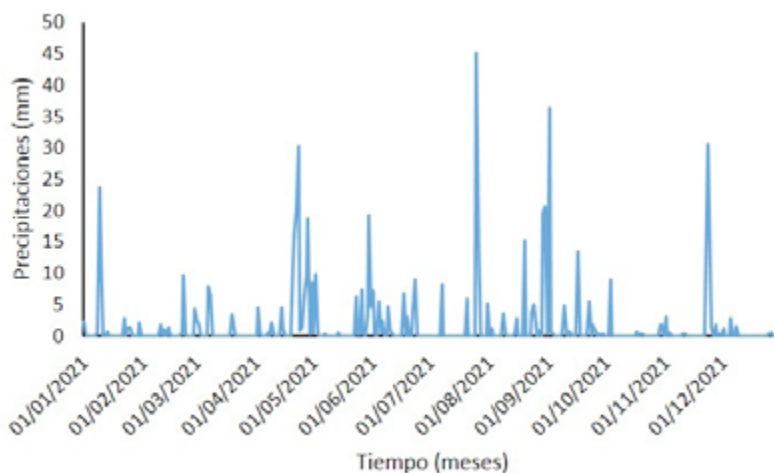


Figura 8.75. Variación de las precipitaciones en Vilafranca del Cid en 2021.

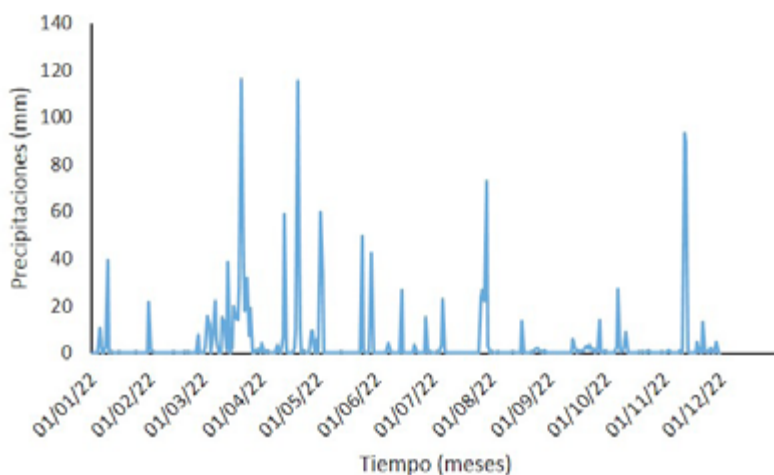


Figura 8.76. Variación de las precipitaciones en Vilafranca del Cid en 2022.

En las figuras 8.75 y 8.76 se distinguen algunos ciclos cortos, asociados a períodos de varios días, con acumulación de precipitaciones que pueden llegar a ser de gran intensidad (120 mm día^{-1}).

Los promedios mensuales de valores medios diarios de temperatura y humedad relativa y los acumulados de precipitación mensual registrados en Vilafranca del Cid durante los años 2021 y 2022 se resumen en las tablas 8.15 y 8.16.

Tabla 8.15. Valores medios mensuales de variables meteorológicas registrados en Vilafranca del Cid en 2021. T (°C), HR (%), Precipitación (mm).

Mes	Valores mensuales						Precipitación
	T _{media}	T _{mínima}	T _{máxima}	HR _{media}	HR _{mínima}	HR _{máxima}	
Enero	3,05	-9,2	19,7	65,1	26	92	60
Febrero	6,68	-1,7	18,5	70,28	21	98	19,6
Marzo	5,99	-4,3	18,8	68,73	22	97	24,2
Abril	7,32	-1,9	18,9	75	13	100	136,2
Mayo	12,52	2,2	23,8	67,49	24	98	62,2
Junio	16,7	6,4	29,4	67,74	20	55	44,4
Julio	20,05	8,4	31,9	57,26	11	95	80,4
Agosto	19,6	8,6	35,3	64,83	18	100	75
Septiembre	15,99	5,7	27	75,53	33	96	66,2
Octubre	11,47	1	22	72,42	27	96	13,6
Noviembre	5,17	-2,8	16,6	73,07	37	95	59,2
Diciembre	6,29	-4,2	22,1	65,89	16	94	10

Tabla 8.16. Valores medios mensuales de variables meteorológicas registrados en Vilafranca del Cid en 2022. T (°C), HR (%), Precipitación (mm).

Mes	Valores mensuales						Precipitación
	T _{media}	T _{mínima}	T _{máxima}	HR _{media}	HR _{mínima}	HR _{máxima}	
Enero	3,86	-8,1	21,9	56,08	11	93	0,8
Febrero	6,02	-4,4	21,2	60,14	9	94	44,4
Marzo	5,04	-2,5	15,7	84,11	27	99	288,6
Abril	8,17	-3,8	21,8	65,49	14	98	136,8
Mayo	15,02	3,7	31	58,84	11	94	103
Junio	19,93	7	32,2	53,61	16	92	28
Julio	21,87	10,3	35,3	54,95	10	95	129
Agosto	21,34	10,3	33,3	55,07	11	93	18,8
Septiembre	16,56	5,4	29,6	66,68	18	96	36,8
Octubre	15,15	5,4	26,8	66,29	17	96	17,2
Noviembre	9,39	-1,5	21,8	65,06	9	94	118,6
Diciembre	7,01	-4	20,6	72,8	20	95	17,8

Las tendencias estacionales de las variables meteorológicas se pueden apreciar mejor eliminando las fluctuaciones asociadas a ciclos cortos irregulares mediante la representación de los valores medios mensuales de temperatura, HR y precipitación que figuran en las tablas 8.15 y 8.16.

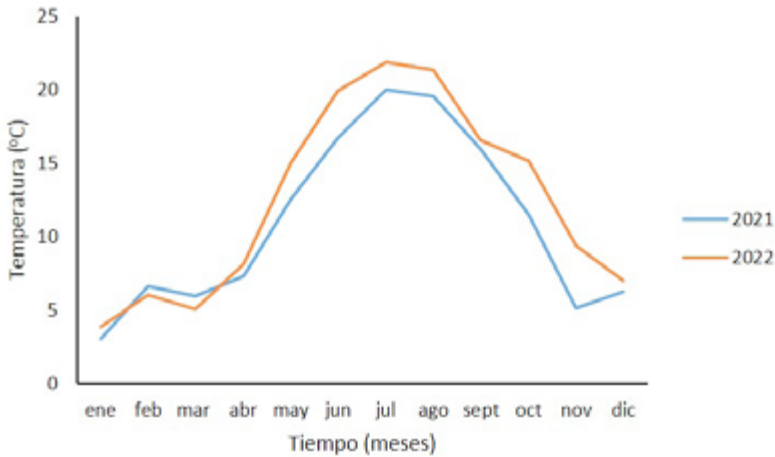


Figura 8.77. Variación del promedio mensual de temperatura diaria en Vilafranca del Cid en 2021 y 2022.

Como muestra la figura 8.77, durante los años 2021 y 2022 se repitió la tendencia creciente de temperaturas que se inicia en enero y se prolonga hasta agosto, mes en el que se invierte la tendencia y las temperaturas medias diarias gradualmente van disminuyendo hasta noviembre. Siguiendo el ciclo estacional de climas templados, la temperatura media mensual se mantiene por debajo de los 10 °C desde noviembre hasta abril (invierno), entre 10 y 20 °C en mayo, junio (primavera), septiembre y octubre (otoño) y se sitúa en torno a los 21 °C en los meses de julio y agosto (verano).

La figura 8.78 muestra la variación de la HR media mensual. Las tendencias estacionales se caracterizan por un descenso de la HR en los meses de estío, llegando hasta 55 %, para ir incrementándose, con fluctuaciones, durante el otoño e invierno. La primavera es el periodo donde se alcanza el mayor nivel de HR coincidiendo con el mayor volumen de precipitaciones, como se describirá seguidamente.



Figura 8.78. Variación del promedio mensual de HR diaria en Vilafranca del Cid en 2021 y 2022.

La figura 8.79 muestra la variación del acumulado mensual de precipitaciones durante 2021 y 2022. Se observa que, en ambos años, se alcanza el máximo volumen de lluvia durante los meses de primavera y, en segundo lugar, en otoño.

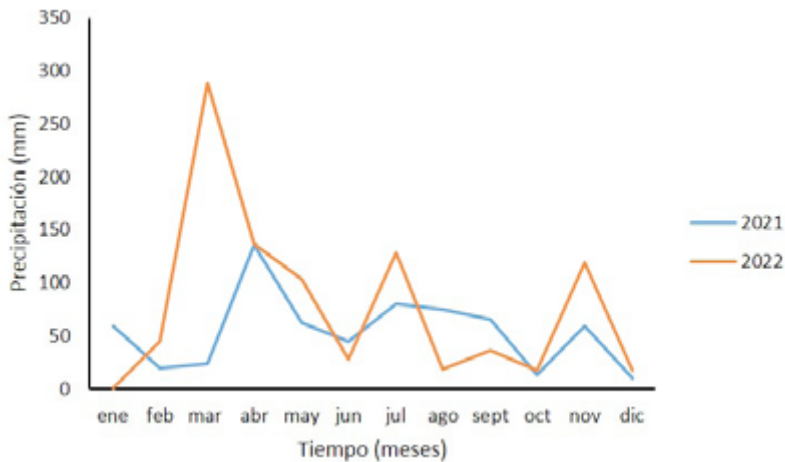


Figura 8.79. Variación del promedio mensual de precipitación diaria en Vilafranca del Cid en 2021 y 2022.

La tabla 8.17 sintetiza los parámetros estadísticos calculados para las variables meteorológicas. Las medias anuales de temperatura se mantienen por debajo de 15 °C, los valores máximos ligeramente superiores a 35 °C y los mínimos en el rango -10 a -8 °C. Las oscilaciones térmicas diarias llegan a superar ligeramente los 27 °C. La dispersión de los valores de temperatura media, dada por el error relativo estándar, alcanza un 59 %, con tendencia de los valores a situarse por encima de la media, tal como indica el coeficiente de asimetría de Fisher (0,3 y 0,8). La HR media anual es de 70,3 % en 2021 y 63,3 % en 2022. Los valores máximos de HR media diaria son 100 % en 2021 y 99 % 2022 y los mínimos 11 % en 2021 y 9 % en 2022, lo que da unas amplitudes de HR de 77 % en 2021 y 72 % en 2022. La dispersión de los valores medios diarios de HR, calculada a partir de la desviación estándar y el error relativo estándar, se establece en valores de 13 y 20 % en 2021 y 17 y 26 % en 2022. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado es -0,1 para 2021 y 2022, lo que pone de manifiesto la tendencia de la HR a situarse ligeramente por debajo de la media anual. Por otra parte, los tiempos de humectación reportados para ambas anualidades son 120 y 106 días. Cabe resaltar que, pese a que en 2022 el número de días en los que se registraron lluvias fue menor que en 2021, la cantidad de agua caída fue superior, lo que es indicativo de la existencia de fenómenos tormentosos más extremos en 2022.

Tabla 8.17. Parámetros estadísticos de variables meteorológicas en Vilafranca del Cid.

Año	Valor máximo anual	Valor mínimo anual	Amplitud anual máxima	Valor medio	Desviación estándar	Error relativo estándar	Coficiente de asimetría de Fisher
Temperatura (°C)							
2021	35,5	-9,2	27,4	11	7	59	0,3
2022	35,3	-8,1	21,6	12,6	8	60	0,8
Humedad Relativa (%)							
2021	100	11	77	70,3	13	20	-0,1
2022	99	9	72	63,3	17	26	-0,1
Precipitación	TOW (días)	Máximo diario anual (mm)			Total anual acumulado (mm)		
	2021	120	45	625,6			
	2022	106	82	1052,4			

8.4.2. Calidad del aire

Las figuras 8.80 a 8.85 muestran la variación de los niveles medios diarios de contaminantes SO₂, NO₂, y O₃ en Vilafranca del Cid durante esos dos años. Los valores bajos de contaminación atmosférica por SO₂ indican que la industrialización de la zona no parece estar contribuyendo de manera apreciable a las emisiones a la atmósfera (figuras 8.80 y 8.81).

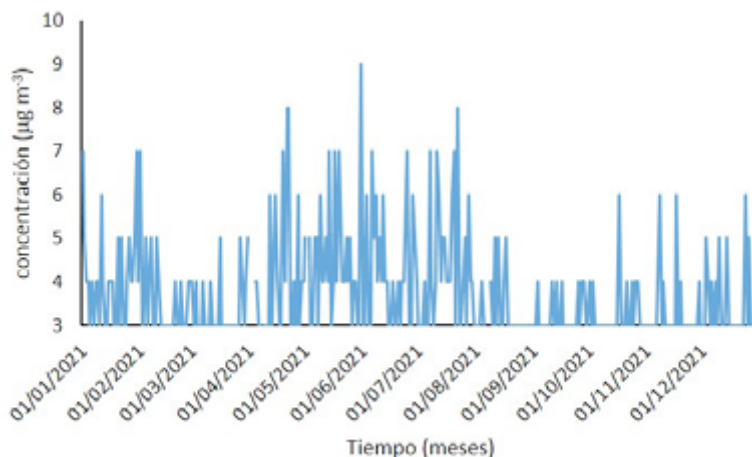


Figura 8.80. Variación del nivel medio diario de SO₂ en aire en el año 2021.

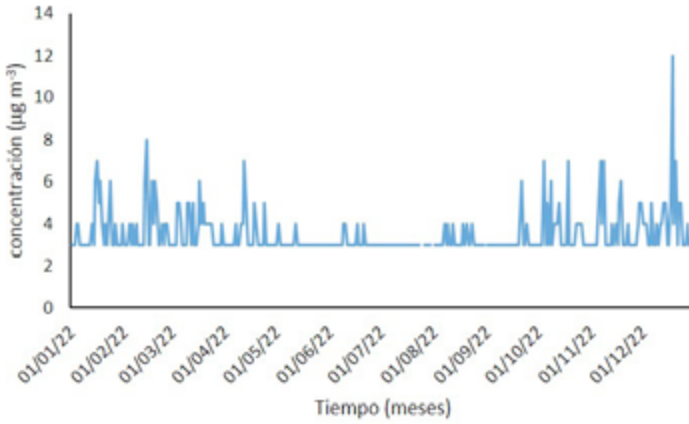


Figura 8.81. Variación del nivel medio diario de SO₂, en aire en 2022.

Los registros diarios de concentración de NO₂ en esta población muestran una tendencia estacional con máximos en primavera y progresiva reducción de los valores diarios hasta el verano (figuras 8.82 y 8.83).

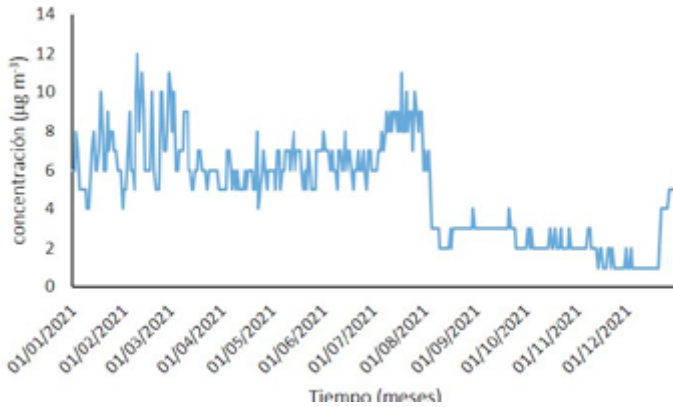


Figura 8.82. Variación del nivel medio diario de NO₂, en aire en 2021.

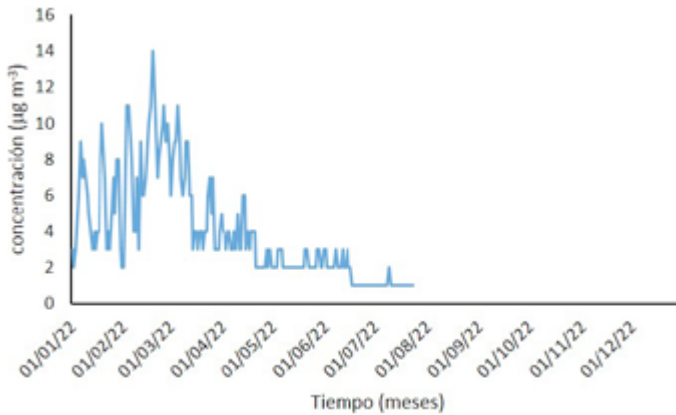


Figura 8.83. Variación del nivel medio diario de NO₂, en aire en 2022.

En las figuras 8.84 y 8.85 se aprecian fluctuaciones cortas, de tres o cuatro días de duración, en las que la concentración de ozono puede variar del orden de $60 \mu\text{g m}^{-3}$. También se observa que la variación estacional exhibe valores ligeramente más elevados en primavera y verano. El factor determinante de este incremento estival es la mayor intensidad de la luz solar y el mayor número de horas con insolación que se correlacionan con las mayores temperaturas registradas en estas estaciones. Sin embargo, la gráfica de dispersión de la figura 8.86, donde se han representado los valores de concentración media diaria de O_3 frente a los valores medios de temperatura durante los dos años en estudio, no muestra una clara correlación entre ambas variables. Los coeficientes de correlación calculados para 2021 y 2022 son 0,15 y $-0,27$, respectivamente.

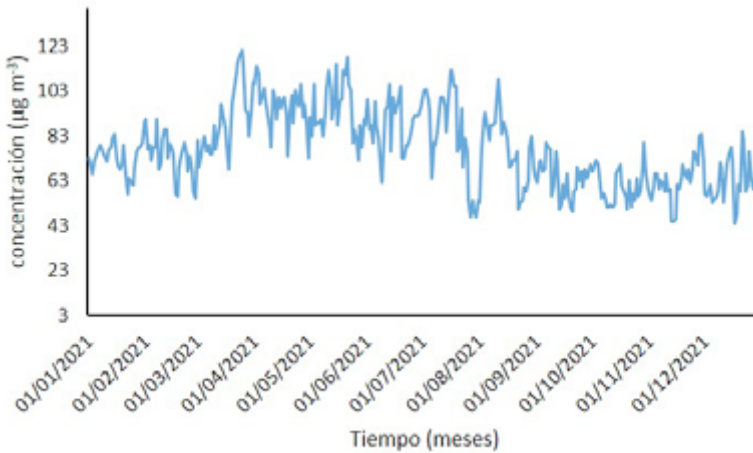


Figura 8.84. Variación del nivel medio diario de O_3 , en aire en 2021.

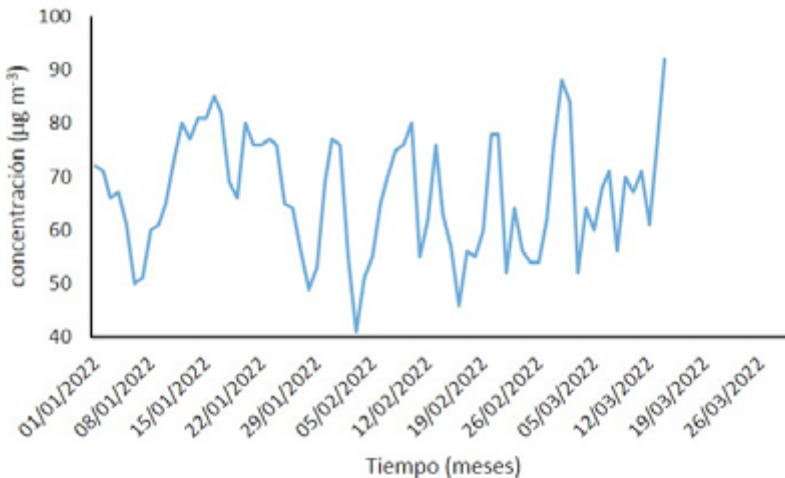


Figura 8.85. Variación del nivel medio diario de O_3 , en aire en 2022.

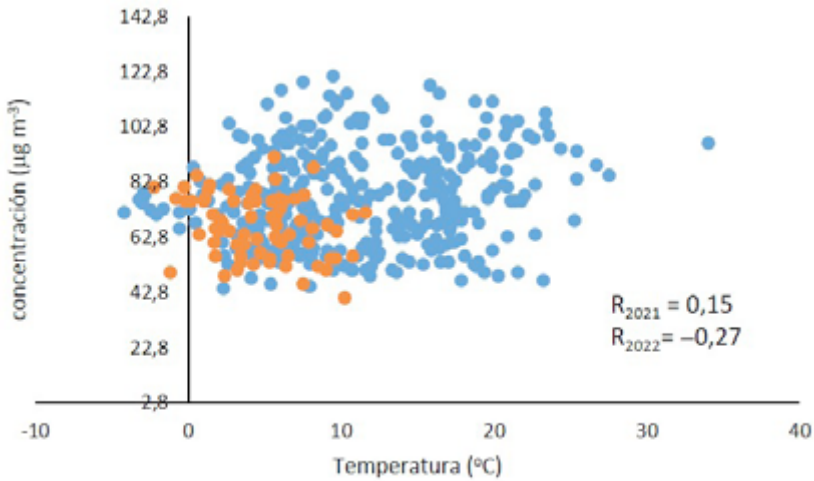


Figura 8.86. Gráfico de regresión de la variable concentración de O₃ frente la temperatura. R₂₀₂₁ y R₂₀₂₂: coeficientes de regresión correspondientes a los años 2021 y 2022.

En la tabla 8.18 se resumen los parámetros estadísticos obtenidos para los registros de variables de calidad del aire en los años 2021 y 2022 en la ciudad de Vilafranca del Cid.

Tabla 8.18. Parámetros estadísticos.

Año	Valor máximo anual	Valor mínimo	Valor medio	Desviación estándar	Error relativo estándar	Coefficiente de asimetría de Fisher
Nivel de SO₂ (mg m⁻³)						
2021	9	3	3,8	1	31	1,8
2022	12	3	3,5	1	29	3,2
Nivel de NO₂ (mg m⁻³)						
2021	12	1	4,9	3	51	0,2
2022	21	1	13	4	65	1,1
Nivel de O₃ (mg m⁻³)						
2021	121	44	77,3	17	22	0,3
2022	92	41	66,6	11	17	0,0

El valor de la concentración media diaria de SO₂ en 2021 fue 3,8 µg m⁻³, siendo el valor más bajo registrado a lo largo del año 3 µg m⁻³ y el más elevado 9 µg m⁻³. La concentración media de SO₂ en 2022 fue también de 3,5 µg m⁻³, siendo el valor más bajo registrado 3 µg m⁻³ y el más elevado 12 µg m⁻³. La dispersión de valores medios diarios, calculada a partir de la desviación estándar y el error relativo estándar, se establece en valores de 1 y 31 %

en 2021 y 1 y 29 % en 2022. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado para 2021 es 1,8 para 2021 y 3,2 para 2022, lo que pone de manifiesto la tendencia clara de los valores a situarse por encima de la media en los dos años.

El valor de la concentración media diaria de NO_2 en 2021 fue $4,9 \mu\text{g m}^{-3}$, acompañado de máximos y mínimos anuales de $12 \mu\text{g m}^{-3}$ y $1 \mu\text{g m}^{-3}$ mientras que en 2022 se reportó un valor medio de $13 \mu\text{g m}^{-3}$ y extremos máximo y mínimo de 21 y $1 \mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente. La dispersión de valores medios diarios, calculada a partir de la desviación estándar y el error relativo estándar, se sitúa en valores de 3 y 51 % en 2021 y 4 y 65 % en 2022. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado para 2021 es 0,2 y para 2022 es 1,1, lo que pone de manifiesto el carácter netamente positivo de la distribución de valores en ambos años.

Por último, el ozono ha mostrado los valores más elevados de concentración de los tres contaminantes en estudio. La concentración media diaria de O_3 en 2021 fue $77,3 \mu\text{g m}^{-3}$, siendo el valor más bajo registrado a lo largo del año $44 \mu\text{g m}^{-3}$ y el más elevado, $121 \mu\text{g m}^{-3}$. La concentración media de O_3 en 2022 fue $66,6 \mu\text{g m}^{-3}$, siendo el valor más bajo registrado $41 \mu\text{g m}^{-3}$ y el más elevado $92 \mu\text{g m}^{-3}$. La dispersión de valores medios diarios, calculada a partir de la desviación estándar y el error relativo estándar, se establece en valores de 17 y 22 % en 2021 y 11 y 17 % en 2022. El coeficiente de asimetría de Fisher calculado para 2021 es 0,3, mostrando tendencia positiva y 0 para 2022, lo que indica una ausencia de tendencia.

Las tendencias estacionales pueden estudiarse mejor a partir de las gráficas de valores medios mensuales que se muestran en las figuras 8.87 a 8.89 para los tres contaminantes en los años 2021 y 2022.

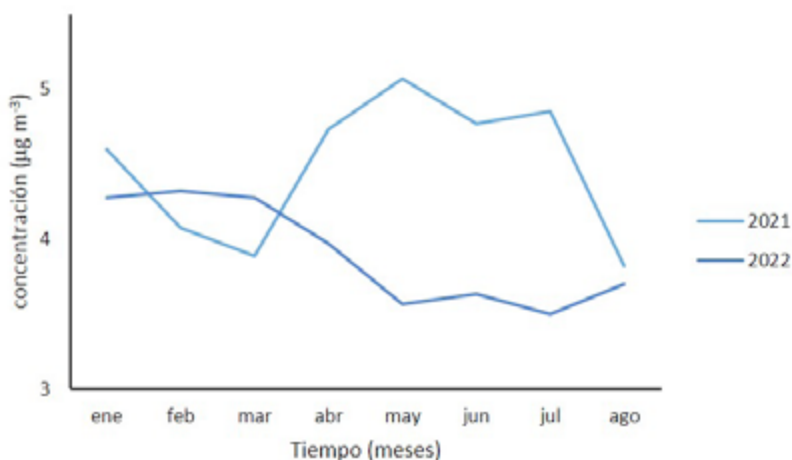


Figura 8.87. Variación de la concentración media mensual de SO_2 en Vilafrañca del Cid en 2021 y 2022.

Las curvas de la figura 8.87 evidencian una disparidad de tendencia estacional en los dos años considerados. Este resultado se asocia a un comportamiento aleatorio debido a los bajos niveles de concentración exhibidos por este contaminante.

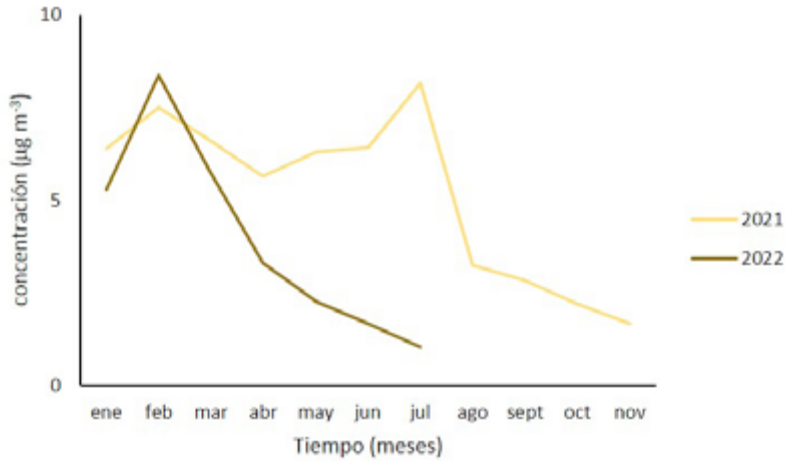


Figura 8.88. Variación de la concentración media mensual de NO₂ en Vilafranca del Cid en 2021 y 2022.

Las gráficas de la figura 8.88 ponen de manifiesto la tendencia de este contaminante a incrementar sus valores en otoño e invierno, con máximos en esta última estación. Sin embargo, la tendencia en los meses estivales no puede discernirse debido a la falta de datos en esos meses en 2022, si bien la tendencia en 2021 es a mantener valores elevados, alcanzándose en verano el máximo anual.

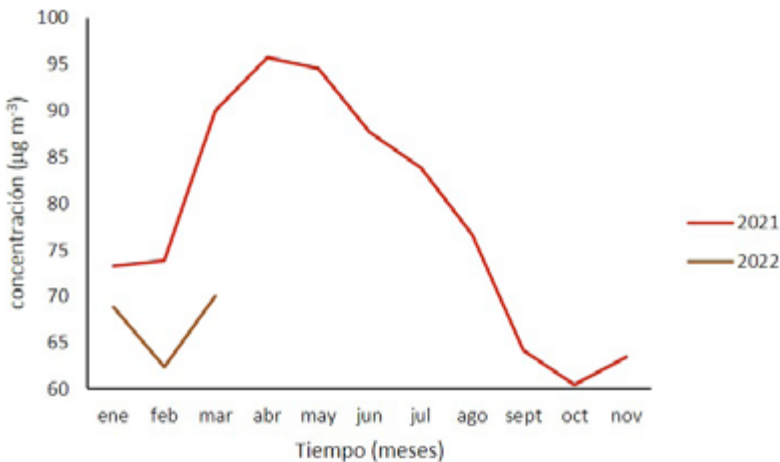


Figura 8.89. Variación de la concentración media mensual de O₃ en Vilafranca del Cid en 2021 y 2022.

Algo similar a lo observado para el contaminante NO₂ sucede con O₃, del que no se dispone de registros en buena parte de 2022. Si se considera la curva obtenida para 2021, mostrada en la figura 8.89, se ponen de manifiesto la tendencia de este contaminante a incrementar sus valores en primavera y verano, con máximos en primavera.

8.4.4. Implicaciones en la conservación de patrimonio ferrotraviario

La figura 8.90 presenta un gráfico en el que se representan los valores promedio mensuales de la oscilación térmica diaria de temperatura durante los años 2021 y 2022. Se comprueba que todos los meses se sobrepasa el límite tolerable para la oscilación térmica diaria, ΔT inferior a $\pm 2-5$ °C, para la conservación de objetos en el interior de edificios y lugares resguardados. También se observa una cierta tendencia a incrementar el valor de esta variable en los meses estivales.

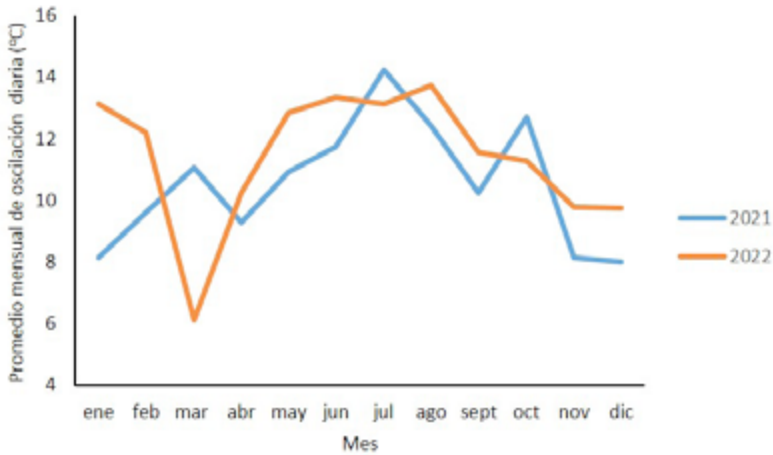


Figura 8.90. Promedio mensual de oscilación térmica diaria.

La figura 8.91 muestra el número de días en los que se registró una oscilación térmica diaria por debajo de un determinado valor a lo largo de los años 2021 y 2022. Se comprueba que la mayor parte del año se superó el valor máximo admisible $\pm 2-5$ °C.

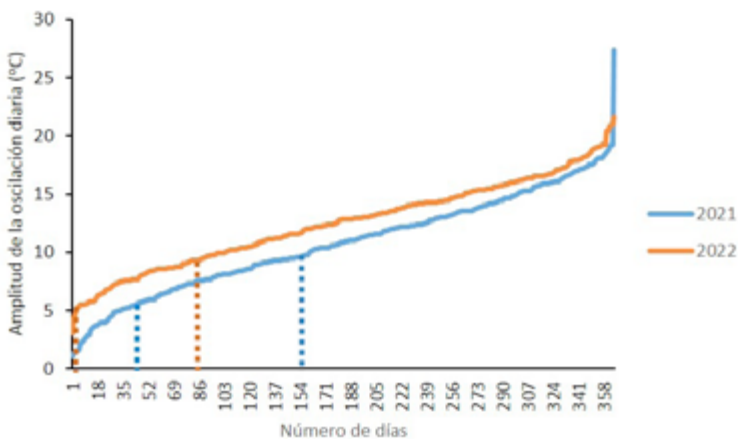


Figura 8.91. Grafica mostrando el número de días con oscilación diaria de temperatura por debajo de un cierto valor.

El promedio mensual de oscilación diaria de HR se ha representado en la figura 8.92. También para esta variable se observa que la mayor parte del año se supera el límite tolerable de ΔHR diaria $\pm 10\%$ HR. Se aprecia una tendencia estacional de crecimiento desde el invierno al verano, que pasaría de oscilaciones del orden de 30-40 % a 45 %, con importantes fluctuaciones en primavera, mientras que la tendencia inversa tendría lugar a partir del otoño.

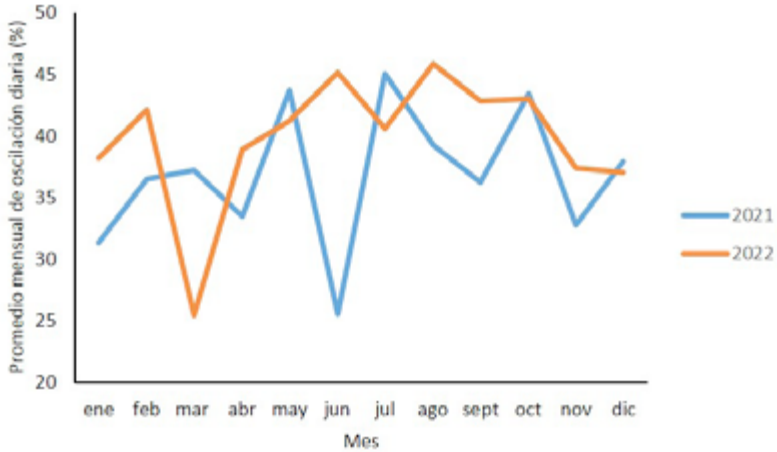


Figura 8.92. Promedio mensual de oscilación diaria de HR.

La figura 8.93 muestra el número de días en los que se registró una oscilación de HR diaria por debajo de un determinado valor a lo largo de los años 2021 y 2022. Se comprueba que en la mayor parte de ambos años se superó el umbral $\pm 10\%$.

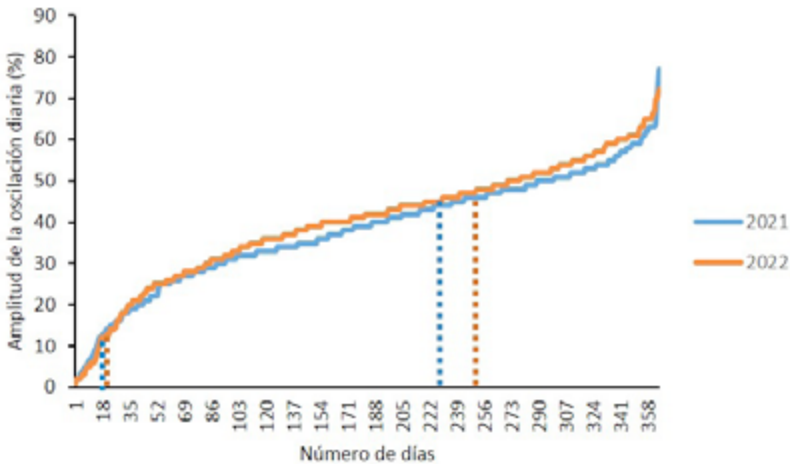


Figura 8.93. Grafica mostrando el número de días con oscilación diaria de HR por debajo de un cierto valor.

La tabla 8.19 compendia el número de días y tasa anual de tiempo, expresada en porcentaje (entre paréntesis), en los que los valores medios de las variables meteorológicas registradas fueron superiores a los valores aceptables en conservación del patrimonio metálico en interiores y lugares resguardados. La temperatura solo se mantiene por encima del valor aceptable un número de días inferior al 8,8 % y 16,4 % del año en las respectivas anualidades 2021 y 2022. La HR supera el límite del 30 % en la práctica totalidad del año. El TOW exhibe valores del 33 y 29 % en las respectivas anualidades.

Tabla 8.19. Tasa anual de tiempo en que los niveles de variables meteorológicas superan a los valores aceptables en conservación del patrimonio.

Año	Número de días al año sobrepasando el valor tolerable	Número de días al año sobrepasando el valor tolerable de oscilación diaria
Temperatura	T > 20 °C	$\Delta T > \pm 2-5$ °C
2021	32 (8,8 %)	341 (93,4 %)
2022	60 (16,4 %)	339 (92,9 %)
HR	HR > 30 %	HR > 10 %
2021	364 (99,7 %)	351 (96,1 %)
2022	356 (97,5 %)	365 (100 %)
Precipitaciones	TOW	
2021	120 días (33%)	
2022	106 días (29 %)	

La tabla 8.20 muestra los valores calculados para la tasa anual de tiempo en que los niveles de contaminantes atmosféricos superan los valores aceptables en conservación del patrimonio en interiores y lugares resguardados. Se observa que los valores de niveles de contaminantes atmosféricos SO₂ y NO₂ no exceden el valor de 10 µg m⁻³ en la práctica totalidad del año en 2021 y lo exceden en torno al 3,4 % del periodo para el que se tienen registros en 2022. El O₃, por el contrario, supera el límite de 2 µg m⁻³ en la totalidad de ambas anualidades. Ello implica que este contaminante puede tener repercusión en la corrosión de patrimonio ferrotraviario.

Atendiendo a los umbrales establecidos para niveles de contaminantes SO₂ y NO₂ en la norma UNE-EN ISO 9223:2012, Vilafranca del Cid podría clasificarse en la categoría C2.

Tabla 8.20. Tasa anual de tiempo en que los niveles de contaminantes atmosféricos superan los valores aceptables en conservación del patrimonio en interiores y lugares resguardados⁵.

Año	Número de días al año con concentraciones superiores a las tolerables		
	SO₂	NO₂	O₃
2021	0	4	365
2022	1	7*	73**

*204 días registrados; **73 días registrados

⁵ No se incluyen porcentajes anuales debido a la gran cantidad de días en los que no se obtuvieron registros.

8.5. Estudio comparativo de las tres localizaciones

El estudio comparativo de las tres localizaciones permite conocer, en primera aproximación, la incidencia que puede tener la ubicación, en el marco de la Comunitat Valenciana y en el momento climático presente, en la conservación de un bien ferroviario. Las características climáticas y de calidad del aire con mayor influencia en la corrosividad de metales para las tres poblaciones en estudio se resumen en las tablas 8.21 y 8.22. De la comparación de los valores calculados para cada población se extrae que solamente Vilafranca del Cid mantiene temperaturas por debajo de 20 °C durante gran parte del año. A pesar de ello, las oscilaciones térmicas diarias siguen superando el umbral tolerable casi todo el año. No hay diferencias entre las tres poblaciones en cuanto a los umbrales de HR y de oscilación diaria de esta, que son rebasados casi todo el año en las tres localidades. En cuanto al tiempo de humectación, Vilafranca del Cid reporta el mayor valor, seguida de Valencia y Alcoi. Si bien la relación en número de días no es muy diferente en los tres casos, si se considera la acumulación de precipitación, se produce una inversión entre Alcoi y Valencia, siendo en esta última población donde se acumula el menor volumen de agua anualmente (tablas 8.5, 8.11 y 8.17).

Tabla 8.21. Comparación de exposición a valores de los parámetros meteorológico-climáticos superiores a los valores de aceptables en conservación del patrimonio.

Año	Alcoi	Valencia	Vilafranca del Cid
Número de días superando el umbral del nivel diario T > 20 °C			
2021	125 (34,3 %)	145 (39,7 %)	32 (8,8 %)
2022	142 (38,0 %)	142 (38,9 %)	60 (16,4 %)
Número de días superando umbral oscilación diaria $\Delta T > \pm 2-5$ °C			
2021	359 (98,4 %)	349 (95,6 %)	341 (93,4 %)
2022	346 (94,7%)	352 (96,4 %)	339 (92,9 %)
Número de días superando el umbral del nivel diario HR > 30 %			
2021	363 (99,5 %)	353 (96,7 %)	364 (99,7 %)
2022	352 (96,4 %)	360 (98,6 %)	356 (97,5 %)
Número de días superando umbral oscilación diaria HR > 10 %			
2021	353 (96,7 %)	345 (94,5 %)	351 (96,1 %)
2022	360 (98,6 %)	348 (95,3 %)	365 (100 %)
Precipitaciones TOW			
	92 días (25,2 %)	90 días (24,7 %)	120 días (33%)
	76 días (20,8 %)	83 días (22,7 %)	106 días (29 %)

En la tabla 8.22 se resume la clasificación por categorías de corrosividad al aire libre en función de diferentes parámetros medioambientales siguiendo la norma UNE-EN ISO 9223:2012 (tablas 6.23 y 6.24). Siguiendo esta norma, la ciudad de Alcoi estaría incluida en la categoría C2-C3, asociada a corrosividades bajas-moderadas. Los principales factores de peligrosidad se deben al valor de tiempo de humectación asociado a corrosividades

moderadas (τ_3) y a la concentración de PM10 (C3). La concentración de SO₂ y NO₂ es muy baja, incluyéndose en la categoría C2. La ciudad de Valencia está situada en la línea de la costa, por lo que exhibe un valor moderado de salinidad aerotransportada que contribuye a la corrosividad (gráfico no mostrado⁶). Además, le corresponde una categoría τ_3 de TOW y la categoría C3 de corrosividad moderada atendiendo a las concentraciones medias anuales de PM2,5 y PM10. No obstante, si se atiende a los bajos valores de concentración de SO₂ y NO₂, le correspondería la categoría C2 de corrosividad. Finalmente, Vilafranca del Cid, registra el valor de TOW más elevado de las tres poblaciones, lo que la sitúa en la categoría de corrosividad alta (τ_4 , C4). Sin embargo, el resto de valores registrados corresponden a rangos de concentración que adscriben esta población a las categorías C3 y C2, al igual que las otras dos poblaciones. Todos estos valores reportados han permitido efectuar descripciones breves del medioambiente de las tres poblaciones, a saber, Alcoy: urbano-industrial, Valencia: urbano-marino y Vilafranca del Cid: rural húmedo.

Tabla 8.22. Clasificación por categorías de corrosividad al aire libre en función de diferentes parámetros medioambientales siguiendo la norma UNE-EN ISO 9223:2012. Los valores mostrados corresponden al más elevado de ambas anualidades. TOW (h año⁻¹); Concentraciones ($\mu\text{g m}^{-3}$).

Parámetro	Clasificación						UNE-EN ISO 9223
	Alcoi		Valencia		Vilafranca del Cid		
TOW (h)	1824	τ_3	2160	τ_3	2880	τ_4	τ_3 : 250-2.500; τ_3 : 2.500-55.000
Concentración SO₂	3,5	P ₀	3,6	P ₀	3,8	P ₀	C2 (c _{SO2} <12)
Concentración NO₂	7,3		12,1		13		C2 (c _{NO2} <25)
Concentración O₃	58		58,6		77,3		No incluido en la norma
Concentración PM2,5	-		11,3		-		C3 (c _{PM2,5} : 10-30)
Concentración PM10	13,6		15,1		-		C3 (c _{PM10} : 10-30)
	Categoría						
	C2-C3		C2-C3		C2-C3		
Tipo de ambiente	Urbano e industrial		Urbano y marino		Rural húmedo		

Considerando un criterio de valoración más restrictivo, la tabla 8.23 muestra el número de días al año con concentraciones superiores al valor umbral tolerable establecido para el interior de edificios y lugares resguardados por el Ministerio de Cultura y Deporte (2009) y la US National Information Standards Organization (Upham, 1992). Según estos criterios, el contaminante atmosférico que entraña mayor riesgo es el O₃, ya que la mayor parte del año se supera el umbral tolerable de 2 $\mu\text{g m}^{-3}$ en las tres poblaciones. El NO₂ supera el umbral de tolerancia un cierto número de días al año en las tres poblaciones, destacando

⁶ Los valores experimentales medidos para 2021 y 2022 pueden consultarse en el volumen 3 de la serie de monografías.

Valencia en 2022. Por el contrario, ninguna de las tres localidades de las que se disponía de datos ha presentado valores reseñables de concentración de SO_2 y de materia particulada $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} .

Tabla 8.23. Comparación de niveles de contaminantes registrados con los valores aceptables en conservación del patrimonio⁷.

Año	Número de días al año con concentraciones superiores al valor umbral tolerable		
	Alcoi	Valencia	Vilafranca del Cid
SO_2			
2021	0	0	0
2022	0	0	1
NO_2			
2021	47	85	4
2022	43	123	7 ^a
O_3			
2021	334	342	365
2022	359	339	73 ^b
$\text{PM}_{2,5}$			
	-	0	-
	-	0	-
PM_{10}			
	1	0	-
	0	0	-

^a204 días registrados.

^b73 días registrados.

Como conclusión a este estudio se establecen las siguientes recomendaciones generales:

- Los tres tipos de poblaciones estudiados presentan características de ambientes corrosivos bajos a moderados (C2-C3). Por consiguiente, aunque no se ha encontrado ninguna situación de alto riesgo, no parece haber ninguna población de las tres consideradas en la Comunitat Valenciana que esté exenta de riesgo de corrosividad en objetos metálicos expuestos en el exterior o en ambientes interiores carentes de climatización. Por tanto, el patrimonio ferrotranviario con componentes metálicos, conservado en estas condiciones, debe ser objeto de seguimiento constante.
- Si es posible, deberían adoptarse medidas de mitigación consistentes en el traslado de los objetos a interiores climatizados, idealmente, o la protección con cubiertas para la lluvia, barreras cortavientos y de drenaje, recubrimientos de inhibición de la corrosión, pinturas autolimpiables, etc.

⁷ No se incluyen porcentajes anuales debido a la gran cantidad de días en los que no se obtuvieron registros.

- El patrimonio ferrotraviario conservado en interiores, incluso en aquellos con sistemas de climatización, tampoco está exento de riesgos de corrosión, por lo que se debe mantener una vigilancia continua de los niveles de las variables meteorológicas y contaminantes atmosféricos en salas de exhibición y almacenes.

8.6. Referencias

AEMET (n.d.) Base de datos. Inventarios históricos meteorológicos on-line. Disponible en: <http://www.aemet.es>. [Consultado 06-08-2023].

ICOM-UNESCO (1971) *Dossier de References Techniques. Centre de Documentation*. ICOM-UNESCO, pp. 15-17.

JSON To CSV Converter (n.d.). Disponible en: <http://www.convertcsv.com>. [Consultado 06-08-2022].

La Fontaine (1985) *Technical Bulletin Institute*. National Museums of Canadá.

Michalski, S. (1994) Relative Humidity and Temperature Guidelines: What's Happening? Disponible en: <https://es.scribd.com/document/396814229/Relative-Humidity-and-Temperature-Guidelines-What-s-Happening-By-Stefan-Michalski#>. [Consultado 9-05-2023].

Ministerio de Cultura (2009) *Normas de conservación preventiva para la implantación de sistemas de control de condiciones ambientales en museos, bibliotecas, archivos, monumentos y edificios históricos*. Disponible en: <https://www.culturaydeporte.gob.es/planes-nacionales/dam/jcr:a8616b46-27cb-45fd-b121-79899d8d6907/ipce-normas-climatizacion.pdf>. [Consultado 9-05-2023].

RVVCCA-GVA (n.d.) Base de datos. Inventarios históricos de calidad de aire on-line. Disponible en: <http://www.agroambient.gva.es>. [Consultado 06-08-2023].

Stolow, N. (1985) *Conservation and Exhibitions*. Butterworths.

Tidblad, J., Kucera, V. y Sherwood, S. (2009) "Corrosion". En: Watt, J., Tidblad, J., Kucera, V. y Hamilton, R. Eds. *The Effects of Air Pollution on Cultural Heritage*, New York: Springer, pp. 53-103. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84893-8>. [Consultado 8-05-2022].

UNE-EN ISO 9223:2012 Corrosión de metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Clasificación, determinación y estimación. UNE Asociación Española de Normalización. Disponible en: <http://une.org>. [Consultado 6-05-2023].

Upham, L.N. (1992) "The Standards Connection", *Journal of Education for Library and Information Science*, 33(1), 72-74.

VVAA. (2014). *Manual de Seguimiento y Análisis de Condiciones Ambientales*. Madrid: MECD. Disponible en: <https://sede.educacion.gob.es/publiventa/descarga.action>. [Consultado 31-08-2022].

8.7. Bibliografía

Vicente-Serrano, S. M., Azorín-Molina, C., Sánchez-Lorenzo, A., Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., Revuelto, J., López-Moreno, J.I. y Espejo, F. (2014a) "Temporal evolution of surface humidity in Spain: recent trends and possible physical mechanisms", *Climate Dynamics*, 42, pp.2655-2674.

Vicente-Serrano, S.M. y Rodríguez Camino, E. (2017) "Tendencias recientes de las variables atmosféricas en España", *Clivar Exchanges*, 73, pp.12-23 y referencias citadas.

Capítulo 9:

Tendencias del clima de la Comunitat Valenciana. Series temporales

Contenidos

- 9.1. Metodología
 - 9.1.1. Selección de localizaciones de captación de datos
 - 9.1.2. Fuentes de suministro de datos climáticos y de calidad de aire
 - 9.1.3. Descarga y procesado de datos
 - 9.1.4. Análisis de datos
- 9.2. Alcoi-Pinoso
 - 9.2.1. Meteorología
 - 9.2.2. Calidad del aire
- 9.3. Valencia
 - 9.3.1. Meteorología
 - 9.3.2. Calidad del aire
- 9.4. Vilafranca del Cid
 - 9.4.1. Meteorología
 - 9.4.2. Calidad del aire
- 9.5. Estudio comparativo
- 9.6. Referencias
- 9.7. Bibliografía

Como se señalaba en el capítulo anterior, para comprender e interpretar correctamente el impacto que el cambio climático tendrá en el patrimonio ferrocarrilario de la Comunitat Valenciana es conveniente analizar lo que ha sucedido en el pasado y lo que está sucediendo en el momento presente. En este capítulo se analiza el comportamiento que ha tenido el clima en la Comunitat Valenciana en las dos últimas décadas.

9.1. Metodología

9.1.1. Selección de localizaciones de captación de datos

Se ha estudiado la evolución anual de los parámetros temperatura (T), humedad relativa (HR), precipitación, contaminantes atmosféricos (SO_2 , O_3 , NO_2) y partículas en

suspensión de tamaños $2,5 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$ (PM 2,5 y PM 10, respectivamente), durante las dos décadas anteriores en tres localidades de la Comunitat Valenciana con particularidades geográficas y climatológicas diferentes: Valencia (provincia de Valencia, clima regional A), Alcoi-Pinoso (clima regional F-G, provincia de Alicante) y Vilafranca del Cid (clima E regional, provincia de Castellón) (figura 9.1). La elección de estas tres localizaciones, en cuanto a sus características climáticas, ya se describió en el capítulo anterior.



Figura 9.1. Distribución de puntos de obtención de datos para el estudio de la tendencia de los datos para cada estación del clima de la Comunitat Valenciana.

9.1.2. Fuentes de suministro de datos climáticos y de calidad de aire

Las tablas 9.1 y 9.2 resumen los datos correspondientes a las fuentes de registros climáticos y de calidad del aire utilizados en este estudio y de las estaciones medioambientales de las que proceden dichos registros.

Tabla 9.1. Bases de datos de registros climáticos y de calidad del aire utilizados en este estudio.

Organismo	Estación	Localización		
		Latitud	Longitud	Altitud
Alcoi				
AEMET	Alcoi	38°42' 40" N	0°27'29" O	534 m

RVCCA	Estación 03009006-Alcoi-Verge dels Lliris	38°41'17,215' N'	0°28'3,513" O	562 m
Pinoso	Pinoso	N 38° 23'59"	1° 2' 17" O	575
RVCCA	Estación 03105001-El Pinós			
Valencia				
AEMET	8416 (Viveros)	39°28'50" O	0°21'59" O	11 m
RVCCA	46250043 (Vivers)	39°28'56,59" N	0°21'13,624" O	6 m
Vilafranca del Cid				
AEMET	Vilafranca	40°26'0" N	0°15'21" O	1131 m
RVCCA	Estación: 12129001-Vilafranca	43°26'12,249"N	1°27'8,121"O	1126 m

Tabla 9.2. Características y procedencia de las variables incluidas en el estudio. *T*: temperatura media diaria; *HR*: HR media diaria; *P*: precipitación acumulada; C_{SO_2} : concentración de SO_2 media diaria; C_{NO_2} : concentración de NO_2 media diaria; C_{O_3} : concentración de O_3 media diaria; $C_{PM_{10}}$: concentración de materia particulada de talla 10 μm media diaria; $C_{PM_{2,5}}$: concentración de materia particulada de talla 2,5 μm media diaria.

Variable registrada	<i>T</i>	<i>HR</i>	<i>P</i>	C_{SO_2}	C_{NO_2}	C_{O_3}	$C_{PM_{2,5}}$	$C_{PM_{10}}$
Alcoi	-	-	-	√	√	√	√	√
Pinoso	√	-	√	-	-	-	-	-
Valencia	√	√	√	√	√	√	√	√
Vilafranca del Cid	√	√	√	√	√	√	-	-

9.1.3. Descarga y procesado de datos

Cada base de datos presenta métodos distintos de consulta, presentación y extracción de datos. Se describe a continuación el procedimiento seguido para obtener dichos datos de las diferentes fuentes.

Los datos facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) se encuentran disponibles en su portal web mediante un formulario de búsqueda cuyos parámetros se pueden programar para obtener las variables climatológicas deseadas en las fechas y estaciones permitidas por el mismo. Para poder acceder a esta base de datos es necesario introducir una clave de acceso (API key) que se puede obtener solicitándola a través del portal web de AEMET (AEMET, n.d.).

Los resultados facilitados por la base de datos AEMET son archivos de metadatos donde están encriptados los parámetros de la búsqueda y sus resultados en ficheros Java Script Object Notation (JSON). Estos archivos de JSON deberán ser posteriormente convertidos en archivos de texto o Comma Separated Values (CSV) compatibles con programas de procesamiento de datos como el *software* Excel de Microsoft. En el presente estudio fue

posible convertir los archivos JSON en CSV utilizando un conversor on-line que permite abrir los datos en fichero de texto y convertirlos a Excel para posterior verificación y tratamiento.

Los datos relativos a los niveles de concentración en aire de partículas en suspensión y contaminantes atmosféricos fueron obtenidos de la base de datos de la Red Valenciana de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica de la Generalitat Valenciana (RVVCCA-GVA). Estos valores se descargan directamente de la base de datos donde se puede elegir la fecha y las estaciones a consultar. Los archivos en formato CSV son fácilmente transportables a Excel (RVVCCA-GVA, n.d.).

Los datos disponibles en las bases de datos son valores medios diarios. Aunque en algún caso se han podido procesar datos hasta 2002, la mayor parte de las series de tiempo históricas se han remontado hasta 2007, año a partir del cual se disponía de datos consistentes tanto de las variables meteorológicas como de calidad del aire.

9.1.4. Análisis de datos

Los datos descargados de las bases de datos-fuente han sido:

- Temperatura media diaria (°C).
- Humedad relativa (HR) media diaria (%).
- Precipitación acumulada diaria (mm).
- Concentración de SO₂ media diaria (µg m⁻³).
- Concentración de NO₂ media diaria (µg m⁻³).
- Concentración de O₃ media diaria (µg m⁻³).
- Concentración de materia particulada de talla 10 µm media diaria (µg m⁻³).
- Concentración de materia particulada de talla 2,5 µm media diaria (µg m⁻³).

Los datos descargados de las bases de datos-fuente se han sometido a diversos tratamientos que se resumen seguidamente:

- *Calculo de valores medios para las cuatro estaciones del año y anuales.*
- *Representación gráfica de los datos anuales.*
- *Representación gráfica de los datos para las cuatro estaciones del año:* estas gráficas complementan las anteriores y permiten reconocer la tendencia de los datos para cada estación de las variables meteorológicas.
- *Tratamientos estadísticos básicos:*
 - a) *Regresión:* este método determinista de análisis multivariante de estadística inferencial se ha utilizado para calcular la tendencia interanual de las series.
 - b) *Medias móviles:* este método no determinista de análisis se ha utilizado para calcular la tendencia interanual de las series que subyace a los ciclos interanuales. Los intervalos utilizados han sido de 3 años (MM3). Para completar las curvas desde el primer año, los primeros dos y cinco años, se han representado los promedios acumulados interanuales.

En la descomposición de las series de tiempo se ha empleado la siguiente terminología:

- *Tendencia*: componente de muy largo plazo (muchos años). Puede ser lineal o no lineal.
- *Ciclo*: componente de plazo medio-corto (unos pocos años). Atendiendo a la morfología de los ciclos interanuales, esto es, su periodo y amplitud, se los ha clasificado en **irregulares** (*heterocedasticidad*) si su amplitud y periodo varía aleatoriamente, **estacionarios** si su amplitud y periodo se mantiene dentro de un margen estrecho de variación con el tiempo y **variables crecientes** o **decrecientes** si su amplitud y periodo aumenta o disminuye progresivamente con el tiempo.
- *Estacional*: es el patrón de cambio asociado a las estaciones climáticas que se reproduce anualmente con igual número de periodos.

9.2. Alcoi-Pinoso

9.2.1. Meteorología

Temperatura

La figura 9.2 muestra la gráfica del promedio anual de temperatura en Pinoso frente al tiempo en el periodo 2007 a 2022. La temperatura media calculada desde el año de 2007 hasta 2022 es 15 ± 5 °C. La línea de tendencia interanual de la temperatura tiene una pendiente ligeramente positiva, indicativa de que la temperatura ha aumentado levemente a lo largo de estas dos últimas décadas. La magnitud de esta variación, calculada para los últimos 14 años, se ha incluido en la tabla 9.3, donde se muestra la ecuación de la función de regresión lineal calculada. Los ciclos tienen carácter bastante estacionario hasta 2012, momento en el que se producen irregularidades. Se observa también un incremento considerable de la amplitud de la componente cíclica en los últimos tres años que ha pasado de $\Delta T < 1$ °C a $\Delta T > 3$ °C.

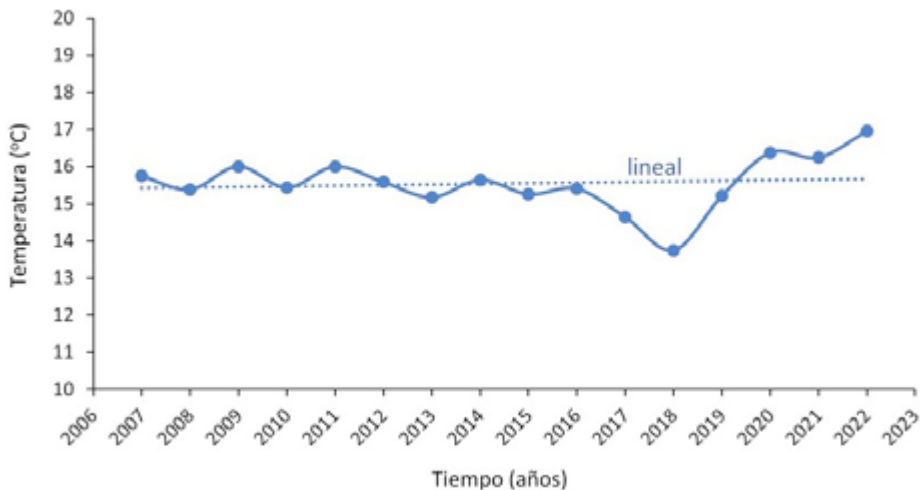


Figura 9.2. Valores promedio anuales de temperatura frente al tiempo en Pinoso.

Tabla 9.3. Funciones y coeficiente de regresión calculados para el promedio anual de temperatura media frente al tiempo en Pinoso. *T*: temperatura (°C); *t*: tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R ²	Incremento de la temperatura en 14 años (°C)
Temperatura	Lineal	$T=0,0166t+17,934$	0,0116	0,25

La tendencia de la componente estacional de esta variable meteorológica se puede comprender mejor a través del estudio de los correspondientes valores medios anuales para las cuatro estaciones del año, representados gráficamente en la figura 9.3. Las series de tiempo correspondientes a las cuatro estaciones del año tienen tendencias de tipo lineal creciente y decreciente, dependiendo de la estación. La descomposición de los datos en sus series temporales por estación permite confirmar que la temperatura tiende a incrementarse durante la primavera, el verano y el otoño y a disminuir durante el invierno. El ciclo anual se desarrolló siguiendo una secuencia constante en la que el valor mínimo se registra en invierno seguido del otoño, la primavera y el verano que es cuando se alcanza el máximo anual. Los ciclos interanuales tienen un carácter aleatorio, si bien se observa un ligero aumento de la amplitud en los últimos tres años. Los valores calculados se listan en la tabla 9.4.

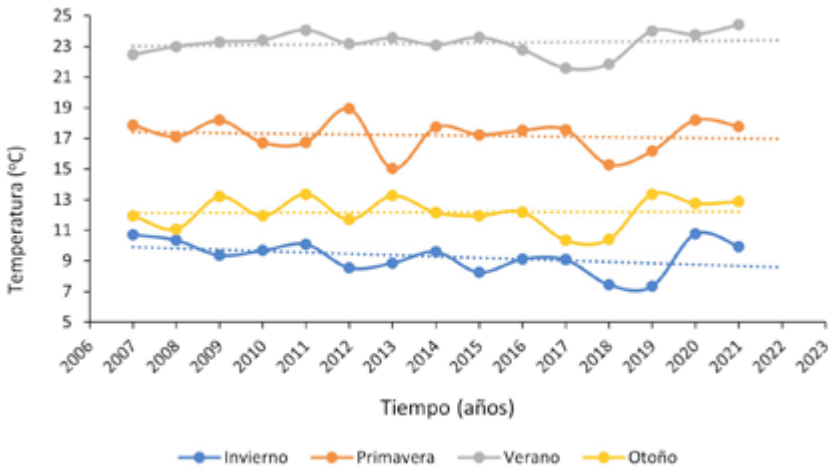


Figura 9.3. Valores promedio de temperatura para las cuatro estaciones del año frente al tiempo en Pinoso.

Tabla 9.4. Funciones y coeficiente de regresión calculados para las series interanuales de temperatura frente al tiempo correspondientes a las cuatro estaciones del año en Pinoso. T : temperatura (°C); t : tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Incremento de la temperatura media estacional en 14 años (°C)
Verano	Lineal	$T=0,0574t-92,343$	0,86
Primavera	Lineal	$T=0,0048t+7,7054$	0,07
Otoño	Lineal	$T=0,0679t-124,37$	1,02
Invierno	Lineal	$T=-0,0675t-145,2$	-1,01

Precipitaciones

Los valores de precipitación media anual registrados durante los años 2007 a 2022 en Pinoso se representan gráficamente frente al tiempo en la figura 9.4. Dado el carácter claramente no lineal de la tendencia y la presencia de ciclos interanuales de muy diversa amplitud en la serie de tiempo, en este caso, se ha optado por describir la tendencia mediante ambos métodos determinista, por regresión polinómica de orden 2, y no determinista, mediante las medias móviles con intervalos de 3 años (MM3). El análisis mediante regresión de los datos promedio anuales muestra una tendencia parabólica convexa con un valor bajo para el coeficiente de regresión al cuadrado (tabla 9.5). La curva de medias móviles, al eliminar la distorsión asociada a ciclos cortos interanuales de la curva original, permite discernir con mayor claridad el comportamiento a largo plazo de las precipitaciones. Se observa, aquí también, un ajuste de regresión de tipo parabólico convexo, pero de mejor calidad ($R^2=0,8780$). Ambos métodos ponen en evidencia una tendencia decreciente hasta 2014, año en el que se alcanza el mínimo de todo el periodo estudiado (valor promedio anual de 169 mm) y en el que se produce el cambio a tendencia creciente que ha proseguido, con alguna fluctuación cíclica irregular, hasta la actualidad.

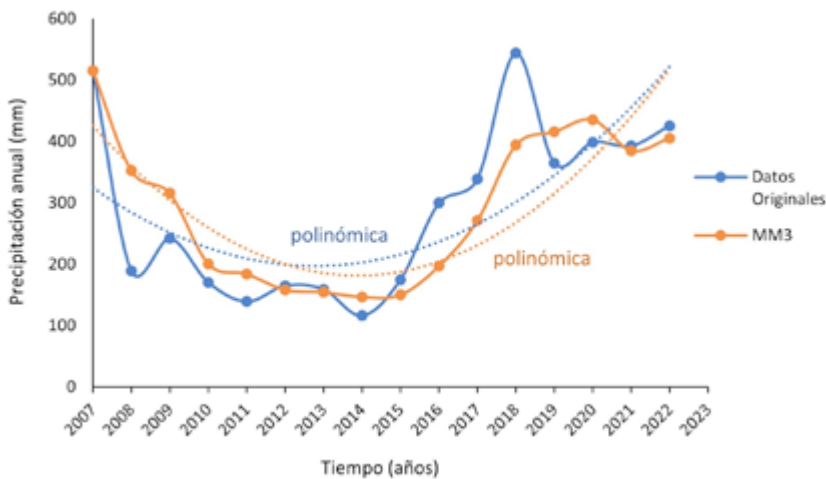


Figura 9.4. Valores promedio anuales de precipitación frente al tiempo en Pinoso.

Tabla 9.5. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de precipitación frente al tiempo en Pinoso. P : precipitación acumulada (mm); P_{MM3} : precipitación acumulada (mm); t : tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R^2	Incremento de la precipitación en 14 años (mm)
P	Polinómica orden 2	$P=3,8259t^2-15401t+2\cdot 10^7$	0,4914	-90,2
P_{MM3}	Polinómica orden 2	$P=5,1343t^2-20680t+2\cdot 10^7$	0,7118	-110,1

La figura 9.5 muestra las gráficas obtenidas a partir de los valores medios de precipitación frente al tiempo para las cuatro estaciones del año. Se observa que se reproduce el perfil de ciclos y tendencia interanual que caracteriza a la gráfica de valores medios anuales. Los ciclos adquieren una mayor amplitud a partir de 2015 tras un periodo 2008-2015 con registros más bajos de precipitación. En las gráficas estacionales llama la atención que el ciclo anual estacional de precipitaciones no siguió una secuencia constante de estaciones a lo largo del periodo 2007-2022, registrándose años en los que las mayores precipitaciones se registraron en primavera seguida del otoño, el invierno y el verano, otros con la secuencia otoño-primavera-verano-invierno, otros con la secuencia invierno, primavera, otoño y verano y así hasta diversas combinaciones de secuencia.

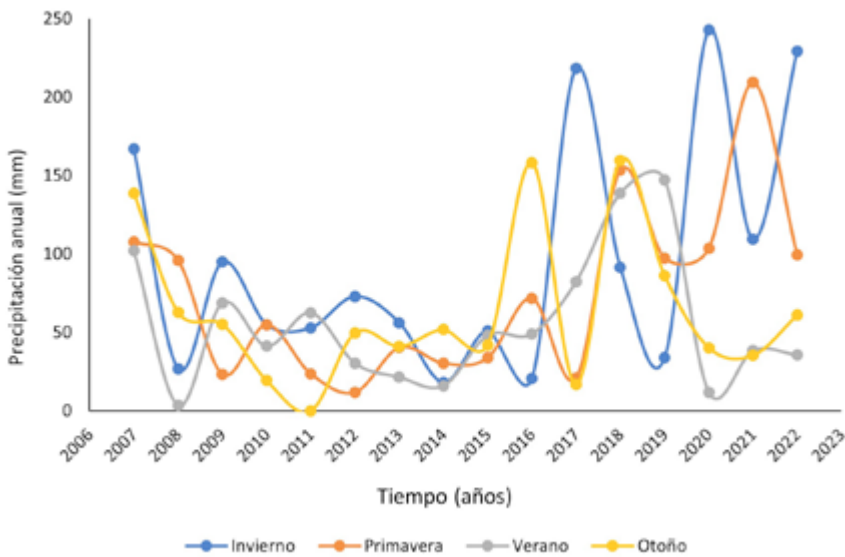


Figura 9.5. Valores promedio anuales de precipitación frente al tiempo para las cuatro estaciones en Pinoso.

9.2.2. Calidad del aire

Concentración de SO_2

La figura 9.6 muestra la curva de concentración media anual de SO_2 en el aire frente al tiempo. Se observa una curva parabólica convexa con una componente cíclica irregular que pone de manifiesto una tendencia decreciente-creciente. En la tabla 9.6 se muestra la ecuación de la función de regresión polinómica de orden segundo calculada a partir de la

curva experimental. El análisis de la tendencia mediante el método de las medias móviles (MM3) y el posterior tratamiento de regresión, proporciona una curva parabólica convexa con una calidad de ajuste mejor que la obtenida para los datos originales al eliminar la distorsión asociada a ciclos interanuales (tabla 9.6). Siguiendo este método, se comprueba que ha habido una tendencia decreciente hasta 2014, la cual se ha invertido, pasando a tendencia creciente hasta el momento presente. El valor de concentración promedio interanual para el periodo 2007-2022 es $3,1 \pm 0,8 \mu\text{g m}^{-3}$. Se trata de un valor muy bajo, claramente alejado del valor $12 \mu\text{g m}^{-3}$ correspondiente a ambientes con corrosividad baja y clasificados en la categoría C2 según la norma UNE-EN ISO 9223:2012. El valor medio de concentración interanual también está por debajo del umbral de tolerancia para la conservación de bienes culturales en ambientes interiores, el cual ha establecido el Ministerio de Cultura (2009) en $10 \mu\text{g m}^{-3}$. Dichos umbrales no han sido superados en todo el periodo histórico registrado. La serie de los datos para cada estación no muestra diferencias estacionales significativas en los valores de concentración de SO_2 (gráfica no mostrada).

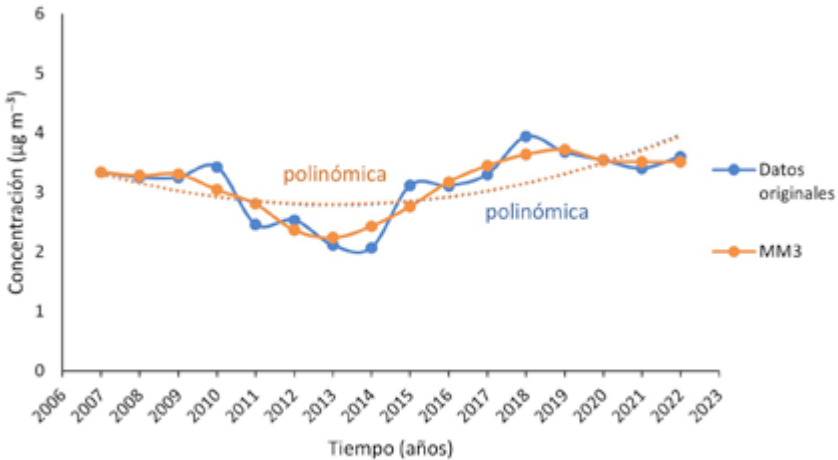


Figura 9.6. Valores promedio anuales de concentración de SO_2 frente al tiempo en Alcoi.

Tabla 9.6. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de concentración de SO_2 frente al tiempo en Alcoi. C_{SO_2} : concentración de SO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$); $C_{\text{SO}_2\text{MM3}}$: concentración de SO_2 MM3 ($\mu\text{g m}^{-3}$); t : tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R^2
C_{SO_2}	Polinómica orden 2	$C_{\text{SO}_2} = 0,0146t^2 - 58,847t + 59233$	0,4317
$C_{\text{SO}_2\text{MM3}}$	Polinómica orden 2	$C_{\text{SO}_2} = 0,0141t^2 - 56,574t + 56944$	0,5115

Concentración de NO_2

La figura 9.7 muestra la curva de concentración media anual de NO₂ en el aire frente al tiempo. Como se pone de manifiesto por los valores del coeficiente de regresión al cuadrado listados en la tabla 9.7, la tendencia interanual se ajusta, de forma similar, a una función exponencial y a una función polinómica de orden dos de tipo parabólico-convexa. Ello evidencia la clara disposición de los valores de concentración de NO₂ a disminuir progresivamente desde 2007. El valor promedio interanual de concentración de este contaminante para el periodo 2007-2022 es 13±6 µg m⁻³. Este valor está por debajo del umbral 25 µg m⁻³ correspondiente a ambientes con corrosividad baja, esto es, de categoría C2 de según la norma UNE-EN ISO 9223:2012. Sin embargo, esta concentración promedio interanual supera el umbral de tolerancia de NO₂ para la conservación de bienes culturales en ambientes interiores, el cual ha establecido el Ministerio de Cultura (2009) en 10 µg m⁻³. Si se observa la gráfica de la figura 9.7 se comprueba que este último umbral de tolerancia no dejó de rebasarse hasta 2019.

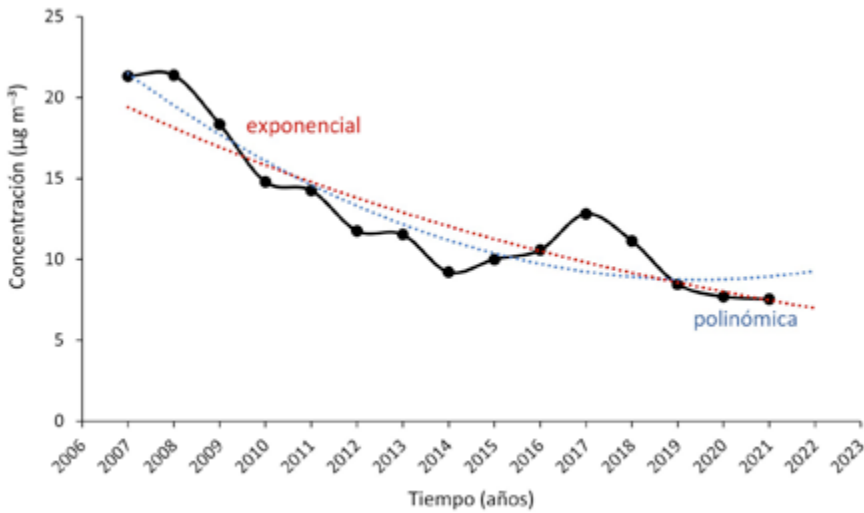


Figura 9.7. Valores promedio anuales de concentración de NO₂ frente al tiempo en Alcoi.

Tabla 9.7. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de concentración de NO₂ frente al tiempo en Alcoi. C_{NO₂}: concentración de NO₂ (µg m⁻³); t: tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R ²
Datos originales de concentración de NO ₂	Exponencial	$C_{NO_2} = 560e^{-0.068t}$	0,821
Datos originales de concentración de NO ₂	Polinómica orden 2	$C_{NO_2} = 0,0822t^2 - 332,02t + 335259$	0,8807

Las gráficas de los valores medios anuales de concentración de NO_2 en cada estación del año frente al tiempo se ilustran en la figura 9.8, confirmándose la tendencia interanual no lineal decreciente que subyace a la componente cíclica irregular. También se comprueba el mantenimiento, a lo largo del periodo histórico en estudio, de la tendencia estacional o anual por la que el máximo valor de concentración se produce en invierno y otoño, presentándose cierta alternancia entre ambas estaciones a través de los años. Los valores mínimos se registran durante la primavera y el verano, estaciones entre las que también se da alguna alternancia. La tabla 9.8 lista las ecuaciones de las funciones de regresión obtenidas para las curvas estacionales. El diagrama de barras de la figura 9.9 muestra los valores interanuales promedio de concentración de NO_2 , para las cuatro estaciones, en el periodo 2007-2022. Según este gráfico, el ciclo estacional anual promedio de este contaminante seguiría un esquema con un valor mínimo del contaminante en verano seguido de un máximo en otoño y progresivo decrecimiento en invierno y primavera.

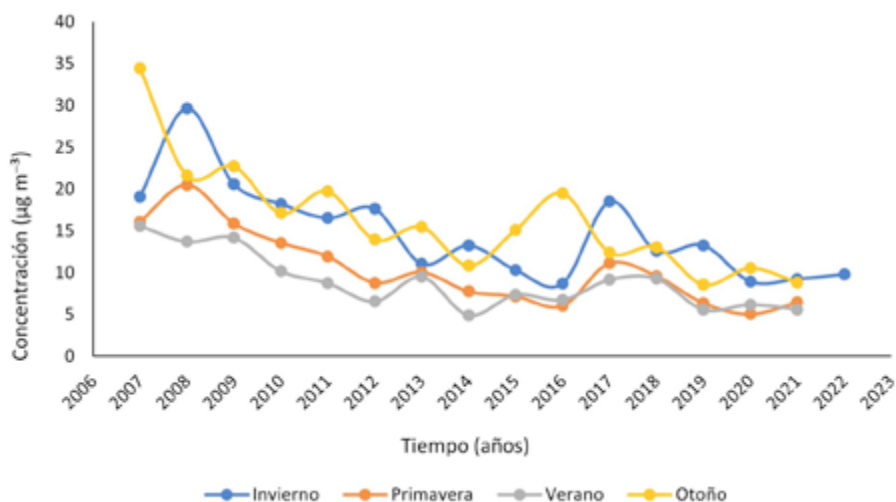


Figura 9.8. Valores promedio de concentración de NO_2 frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Alcoi.

Tabla 9.8. Funciones y coeficiente de regresión calculados para las series interanuales de concentración de NO_2 frente al tiempo correspondientes a las cuatro estaciones del año en Alcoi. C_{NO_2} : concentración de NO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$); t : tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Incremento de C_{NO_2} en 14 años ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Verano	Polinómica orden 2	$C_{\text{NO}_2}=0,0735t^2-296,5t+299166$	-10
Primavera	Polinómica orden 2	$C_{\text{NO}_2}=0,0767t^2-309,96t+312983$	-10
Otoño	Polinómica orden 2	$C_{\text{NO}_2}=0,1075t^2-434,35t+438647$	-26
Invierno	Polinómica orden 2	$C_{\text{NO}_2}=0,0682t^2-275,7t+278614$	-9

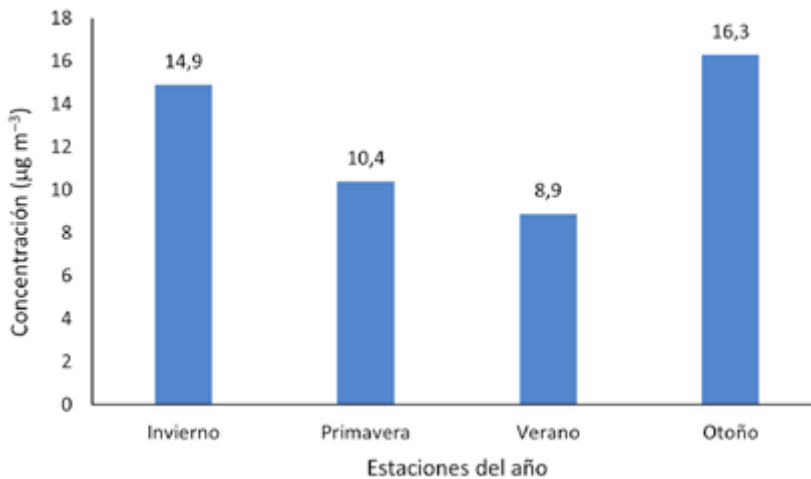


Figura 9.9. Diagrama de barras mostrando los valores promedio de concentración de NO_2 para las cuatro estaciones del año en Alcoi durante el periodo 2007-2022.

Concentración de O_3

Los valores promedio anuales de concentración del contaminante O_3 , registrados en Alcoi, se presentan en la figura 9.10 junto con las medias móviles calculadas a tres años (MM3). Se observa que durante el periodo 2007-2022 la concentración de O_3 ha tenido una tendencia no lineal experimentado un progresivo incremento hasta el 2013, año en el que se invierte la tendencia, y comienza a ser decreciente hasta el momento presente. También se observan, superpuestos a la tendencia interanual, ciclos cortos e irregulares de pequeña amplitud. Ambas curvas, de datos originales y de medias móviles, han sido sometidas a un proceso de regresión para caracterizar la tendencia interanual. Estos tratamientos han permitido obtener funciones de tipo parabólico cóncavo (polinómico orden 2) con buenos ajustes, especialmente, la curva MM3, tal como se indica en la tabla 9.9. El valor promedio de concentración de ozono para el periodo completo en estudio es $66 \pm 10 \mu\text{g m}^{-3}$, lo cual sitúa a este contaminante muy por encima del umbral de tolerancia para la conservación de bienes culturales en ambientes interiores, el cual está establecido por el Ministerio de Cultura (2009) en $2 \mu\text{g m}^{-3}$.

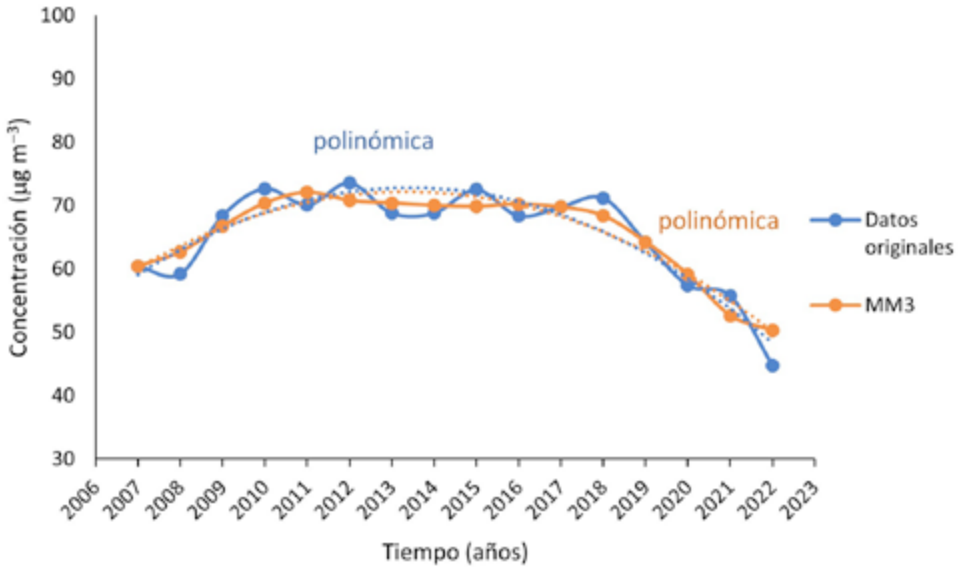


Figura 9.10. Valores promedio anuales de concentración de O₃ frente al tiempo en Alcoi.

Tabla 9.9. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de concentración de O₃ frente al tiempo en Alcoi. C_{O₃}: concentración de O₃ (µg m⁻³); C_{O₃ MM3} concentración de O₃ MM3 (µg m⁻³); t: tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R ²
Datos originales de concentración de O ₃	Polinómica orden 2	$C_{O_3} = -0,2936t^2 - 1182,2t - 10^5$	0,8210
MM3	Polinómica orden 2	$C_{O_3 \text{ MM3}} = -0,2256t^2 - 908,75t - 914996$	0,9789

Las series interanuales de los valores de concentración de O₃ para cada estación se muestra en la figura 9.11 en la que se observa que las curvas de promedios para las cuatro estaciones del año siguen la misma tendencia interanual parabólica que las medias anuales y los mismos ciclos irregulares. La representación de los datos correspondientes a las cuatro estaciones confirma la correlación entre el aumento de la concentración de contaminante y las estaciones más cálidas y con mayor insolación¹, verano y primavera. La tabla 9.10 lista las ecuaciones obtenidas para las funciones de regresión correspondientes a las curvas estacionales. El diagrama de barras de la figura 9.12 resume los valores promedio de concentración estacional de O₃ calculados para el periodo 2007-2022. Estos valores permiten hacer una estimación de la estacionalidad anual de este contaminante con un valor mínimo en otoño y progresivo aumento en invierno, máximo en primavera y comienzo del decrecimiento en verano.

¹ Lo que se asocia a un mayor índice UV que favorece las reacciones de formación de ozono.

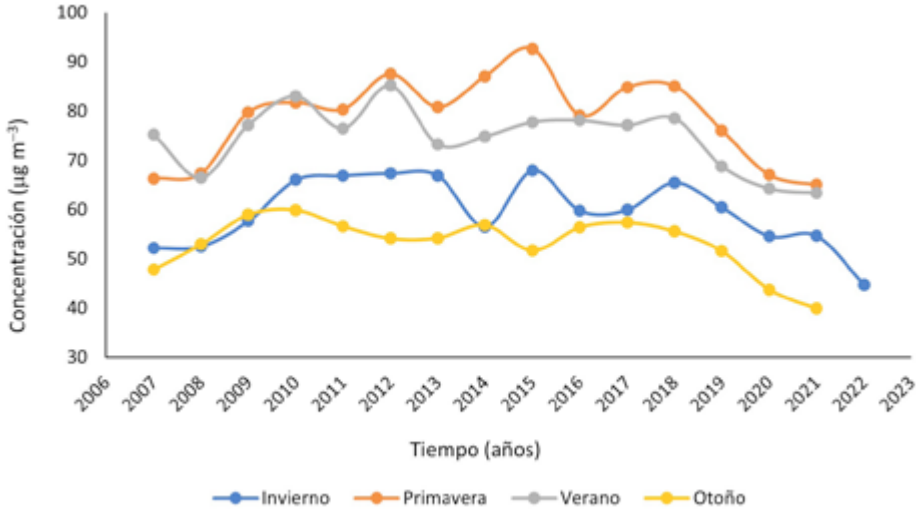


Figura 9.11. Valores promedio de concentración de O₃ frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Alcoi.

Tabla 9.10. Funciones y coeficiente de regresión calculados para el promedio de concentración de O₃ frente al tiempo correspondientes a las series interanuales para las cuatro estaciones del año en Alcoi. C_{O₃}: concentración de O₃ (µg m⁻³); t: tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Incremento de C _{O₃} en 14 años (µg m ⁻³)
Verano	Polinómica orden 2	$C_{O_3} = -0,237t^2 + 954,14t - 960150$	-5
Primavera	Polinómica orden 2	$C_{O_3} = -0,4544t^2 + 1830,5t - 2E+06$	-14
Otoño	Polinómica orden 2	$C_{O_3} = -0,2245t^2 + 903,82t - 909510$	-19
Invierno	Polinómica orden 2	$C_{O_3} = -0,2788t^2 + 1122,8t - 1E+06$	-14

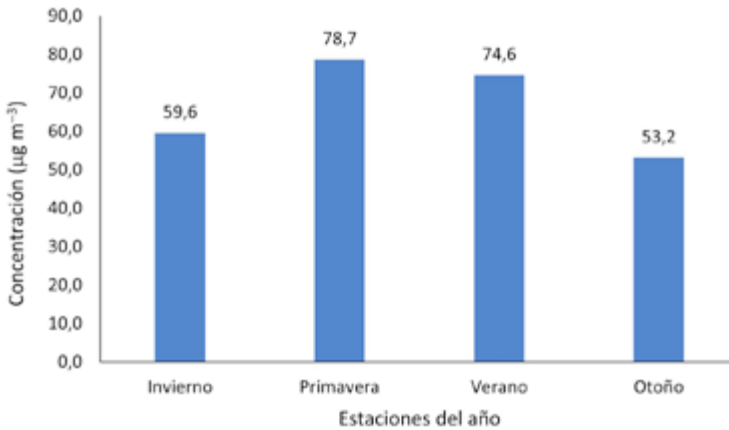


Figura 9.12. Diagrama de barras mostrando los valores promedio interanuales de concentración de O₃ para las cuatro estaciones del año en Alcoi durante el periodo 2007-2022.

Concentración de PM10 y PM2,5

Los promedios anuales de la concentración de las partículas PM10 y PM 2,5² se muestran en la figura 9.13. El análisis de regresión permite ajustar bien estas curvas a una función de tipo polinómico de orden 2 (parabólica convexa) cuya ecuación se presenta en la tabla 9.11. Los datos registrados indican que en Alcoi las emisiones de partículas han seguido una tendencia no lineal decreciente con un primer periodo (2007-2010) lineal con ausencia de ciclos, seguido de un periodo (2011-2016) en el que tienen lugar fluctuaciones cíclicas irregulares más acentuadas. A partir de 2016, los ciclos tienen menor amplitud y la tendencia descendente es mucho más suave. Los valores registrados se encuentran por debajo de 75 µg m⁻³, que es el valor que establece la US National Information Standards Organization (Upham, 1992), en todo el periodo estudiado. Sin embargo, se sitúa en el intervalo 10-30 µg m⁻³ que establece la norma UNE-EN ISO 9223:2012 para ambientes pertenecientes a la categoría C3 de corrosividad moderada.

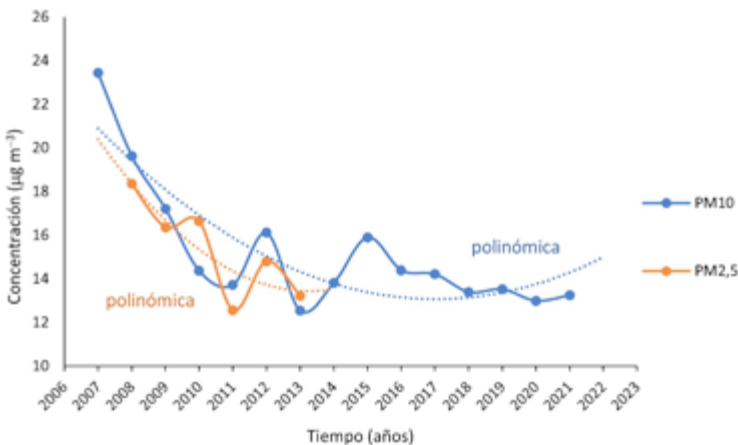


Figura 9.13. Valores promedio anuales de concentración de PM10 y PM2,5 frente al tiempo en Alcoi.

² Dado el escaso número de años con registros de concentración de PM2,5 no se ha considerado hacer una estimación de parámetros estadísticos por la poca representatividad que tendrían.

Tabla 9.11. Función y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de concentración PM10 frente al tiempo en Alcoi. C_{PM10} : concentración de PM10 ($\mu\text{g m}^{-3}$); t : tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R^2
Datos originales de concentración de PM10	Polinómica orden 2	$C_{PM10} = -0,0778t^2 - 314,01t - 316697$	0,7207

La descomposición de los valores de concentración de PM10 en series de promedios anuales por estaciones se muestra en la figura 9.14. Se observa que las curvas representadas para las cuatro estaciones del año siguen el mismo perfil cíclico irregular y la misma tendencia interanual parabólica que las medias anuales. La representación de los datos de acuerdo con las estaciones del año muestra que los valores más altos de concentración se registraron en la estación de verano seguida de la primavera y, por último, el otoño y el invierno que se alternan de unos años a otros. La tabla 9.12 lista las funciones de regresión obtenidas para las curvas estacionales. El diagrama de barras de la figura 9.15 muestra los valores promedio de concentración estacional de PM10 para el periodo 2007-2022. Este diagrama muestra que, en general, durante el periodo en estudio se ha mantenido el ciclo estacional con el máximo situado en verano seguido de la primavera y finalmente el invierno y el otoño.

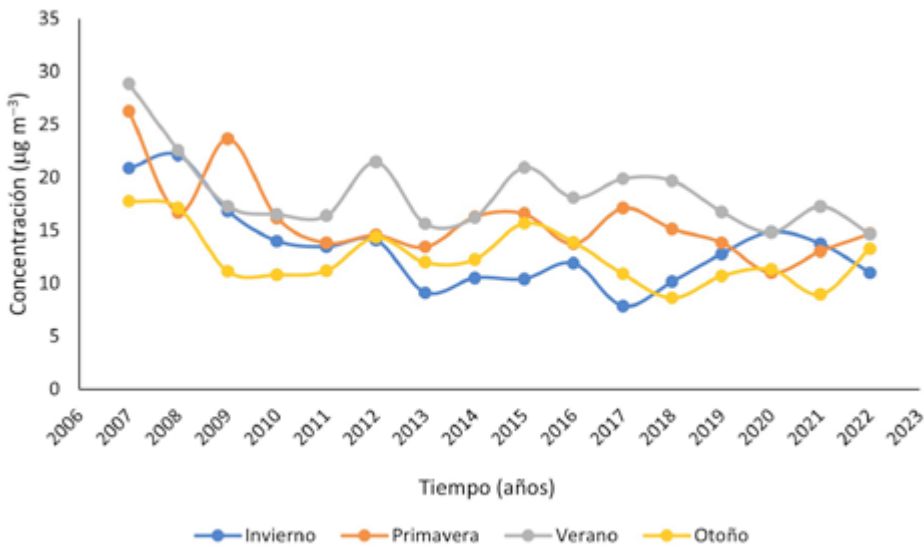


Figura 9.14. Valores promedio de concentración de PM10 frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Alcoi.

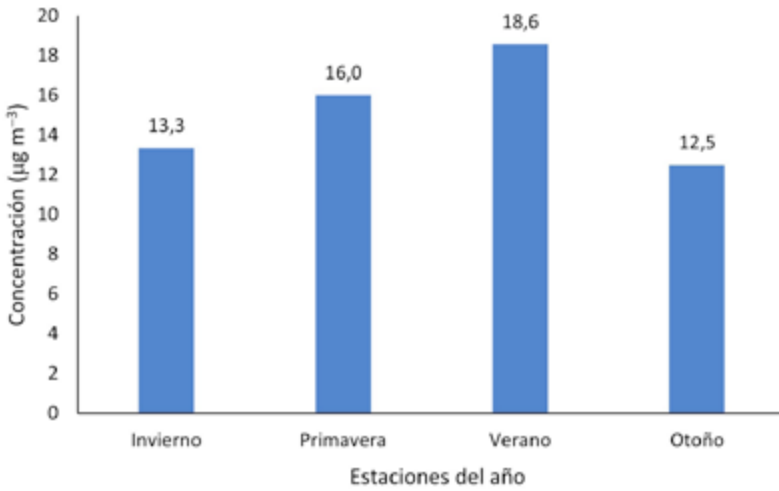


Figura 9.15. Diagrama de barras mostrando los valores promedio de concentración de PM10 para las cuatro estaciones del año en Alcoi durante el periodo 2007-2022.

Tabla 9.12. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de concentración de PM10 frente al tiempo en Alcoi. C_{PM10} : concentración de PM10 (µg m⁻³); t : tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Incremento de C_{PM10} estacional en 14 años (µg m ⁻³)
Verano	Polinómica orden 2	$C_{PM10}=0,0438t^2-176,97t+178684$	-8,7
Primavera	Polinómica orden 2	$C_{PM10}=0,0695t^2-280,42t+282999$	-19,6
Otoño	Polinómica orden 2	$C_{PM10}=0,0316t^2-127,56t+128789$	-10,2
Invierno	Polinómica orden 2	$C_{PM10}=0,1309t^2-527,99t+532323$	-33,2

9.3. Valencia

9.3.1. Meteorología

Temperatura

En la figura 9.16 se muestra la gráfica de los promedios anuales de temperatura, registrados en Valencia en el periodo 2007 a 2022, frente al tiempo. La curva muestra ciclos irregulares que siguen una tendencia interanual lineal con una pendiente positiva, indicativa de un incremento progresivo de 0,8 °C a lo largo de estas dos últimas décadas. La temperatura media calculada desde el año de 2007 hasta 2022 es de 19±1 °C. En la tabla 9.13 se incluye la ecuación de la función de regresión calculada que, debido a la existencia de ciclos interanuales de cierta magnitud, no exhibe muy buen ajuste.

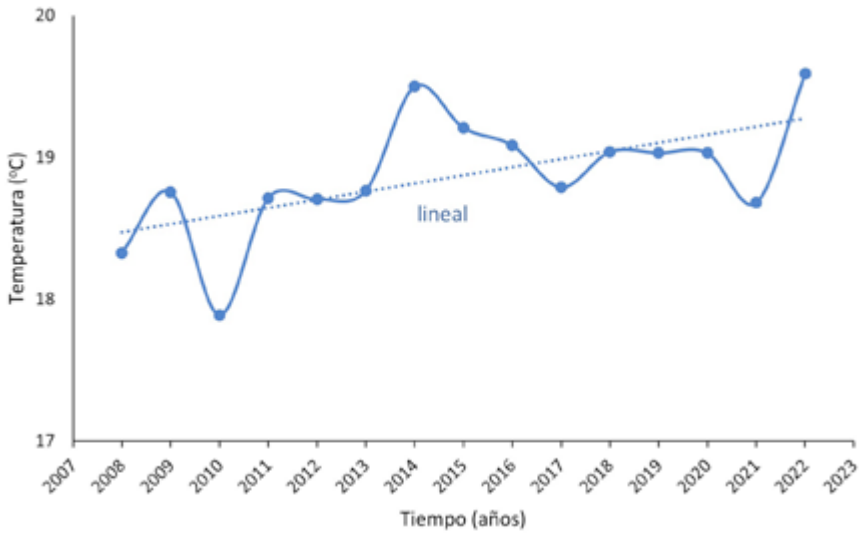


Figura 9.16. Valores promedio anuales de temperatura frente al tiempo en Valencia.

Tabla 9.13. Funciones y coeficiente de regresión calculados para el promedio anual de temperatura frente al tiempo en Valencia. *T*: temperatura (°C); *t*: tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R ²	Incremento de la temperatura en 14 años (°C)
Temperatura	Lineal	$T=0,0571t-96,267$	0,3609	0,8

El comportamiento de los valores medios anuales se puede ilustrar más detalladamente a través del estudio de los correspondientes valores medios para las cuatro estaciones del año, representados gráficamente en la figura 9.17. La descomposición de los datos originales en sus series temporales estacionales permite confirmar que las temperaturas más elevadas, a lo largo del año, se presentaron en verano y primavera seguidas del otoño e invierno. Las funciones lineales de tendencia calculadas indican que en todas las estaciones tiene lugar un incremento positivo de temperatura, ligeramente superior en las estaciones de verano y otoño, que han sufrido un incremento de más de un 1°C a lo largo de los últimos 14 años. Los valores calculados se listan en la tabla 9.14.

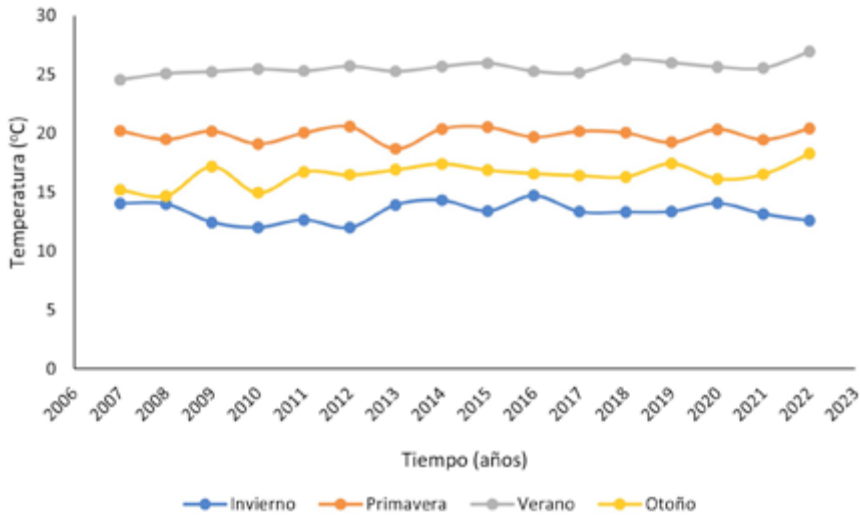


Figura 9.17. Valores promedio de temperatura para las cuatro estaciones del año frente al tiempo en Valencia.

Tabla 9.14. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de temperatura frente al tiempo en Valencia. T : temperatura (°C); t : tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Incremento de la temperatura media estacional en 14 años (°C)
Verano	Lineal	$T=0,0824t-140,49$	1,2
Primavera	Lineal	$T=0,0103t-0,7543$	0,1
Otoño	Lineal	$T=0,1131t-211,25$	1,6
Invierno	Lineal	$T=0,0144t-15,694$	0,2

Humedad relativa

Los valores de humedad relativa media anual registrados durante los años 2007 a 2022 en Valencia se representan gráficamente frente al tiempo en la figura 9.18. Esta variable meteorológica presenta ciclos irregulares en su serie de tiempo. La tendencia lineal, determinada mediante regresión (tabla 9.15) muestra un comportamiento decreciente de la HR que produjo un descenso neto del 4,3 %. El valor promedio de la HR, calculado para el periodo completo 2007-2022, es de 67 ± 5 %. Con objeto de mejorar la calidad del ajuste de la curva de tendencia, se procedió al tratamiento de datos por el método de las medias móviles seguido de un tratamiento de regresión lineal. Los resultados obtenidos se muestran también en la figura 9.18 y en la tabla 9.15. Se comprueba que la regresión lineal practicada sobre las medias móviles aporta una aproximación muy similar a la realizada directamente sobre los datos anuales originales.

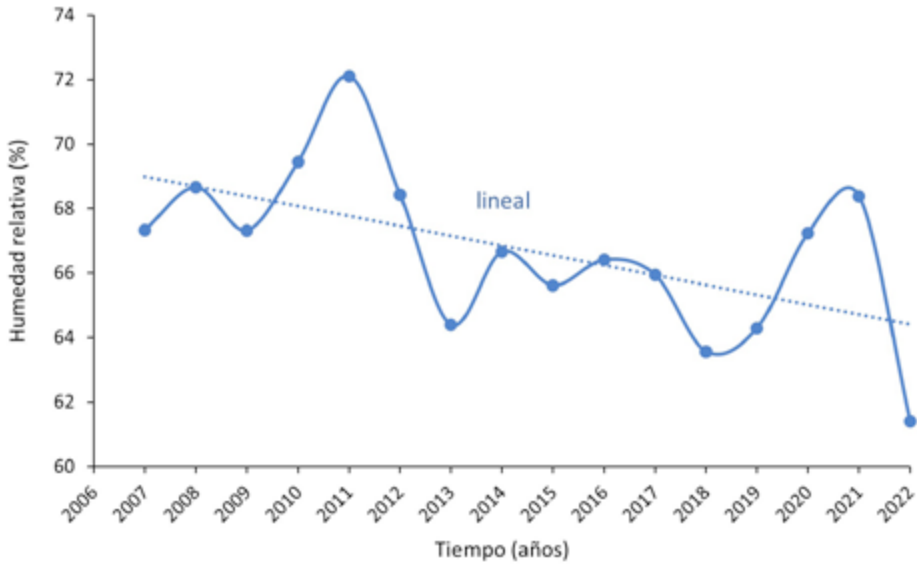


Figura 9.18. Valores promedio anuales de HR y medias móviles a tres años (MM3) frente al tiempo en Valencia.

Tabla 9.15. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de HR frente al tiempo en Valencia y para las medias móviles a tres años MM3. *HR*: humedad relativa (%); HR_{MM3} : humedad relativa MM3 (%); *t*: tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R^2	Incremento de la HR en 14 años (%)
HR	Lineal	$HR = -0,3048t - 680,7$	0,3211	4,3
HR_{MM3}	Lineal	$HR_{MM3} = -0,3027t - 676,6$	0,6138	

El comportamiento de la HR se comprende mejor mediante el estudio de los valores medios para cada estación del año, representados gráficamente en la figura 9.19. La descomposición de los datos en series de valores promedio para cada estación y año muestra ciclos irregulares. Las series temporales obtenidas no permiten establecer una secuencia estacional clara para la HR. Se observan años en los que la máxima HR se alcanza en verano seguida del otoño, la primavera y el invierno y otros en los que el máximo tiene lugar en invierno seguida del verano, el otoño y la primavera. Las curvas de tendencia lineal calculadas indican que en todas las estaciones tuvo lugar un descenso de HR que es mayor en las estaciones de primavera ($\Delta HR = -4,1\%$ en 14 años) y verano ($\Delta HR = -2,5\%$ en 14 años). Los resultados obtenidos en el tratamiento por regresión lineal se listan en la tabla 9.16.

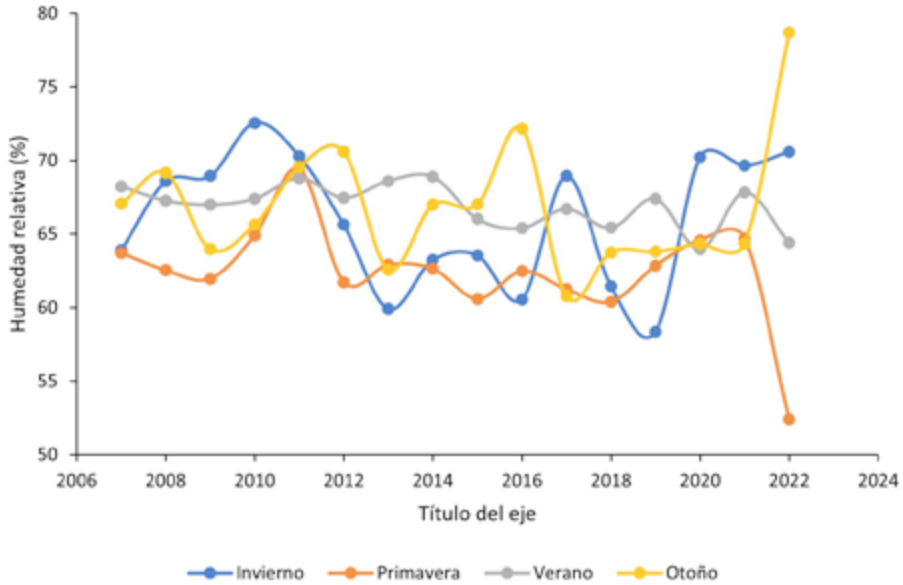


Figura 9.19. Valores promedio de HR para las cuatro estaciones del año frente al tiempo en Valencia.

Tabla 9.16. Funciones y coeficiente de regresión calculados para las series interanuales de HR frente al tiempo correspondientes a las cuatro estaciones del año en Valencia. *HR*: humedad relativa (%); *t*: tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Variación de la HR en 14 años (%)
Verano	Lineal	$HR = -0,1817t - 432,89$	-2,5
Primavera	Lineal	$HR = -0,2937t - 654,04$	-4,1
Otoño	Lineal	$HR = -0,2345t - 538,76$	-0,3
Invierno	Lineal	$HR = -0,0617t - 190,38$	-0,9

Precipitaciones

Los valores de precipitación media anual registrados durante los años 2000 a 2022 en Valencia se representan gráficamente frente al tiempo en la figura 9.20. La curva de la serie histórica presenta una forma muy irregular debido a la elevada heterocedasticidad de los ciclos que se van sucediendo a lo largo del periodo en estudio. Debido a las características tan irregulares de la curva de precipitaciones versus tiempo también se ha optado por describir la tendencia interanual mediante el método de las medias móviles seguido de

una regresión lineal. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 9.20. En primera aproximación, se aprecia el periodo 2000-2006, en el que se llegaron a acumular 850 mm año⁻¹, seguido de un descenso notable de la precipitación anual acumulada hasta los ~300 mm, registrados entre 2012 y 2014, tras lo cual la precipitación fue incrementándose progresivamente hasta los ~700 mm registrados en 2022 con un máximo 800 mm en 2018. La curva de media móvil MM3 confirma la tendencia decreciente durante el periodo 2000-2006 bastante ajustada a la linealidad, si se excluye el año 2018 que fue mucho más lluvioso que los años inmediatamente anteriores y posteriores. Las funciones obtenidas por regresión lineal se muestran en la tabla 9.17. El valor promedio de la precipitación, calculado para el periodo completo 2000-2022, es 500±200 mm.

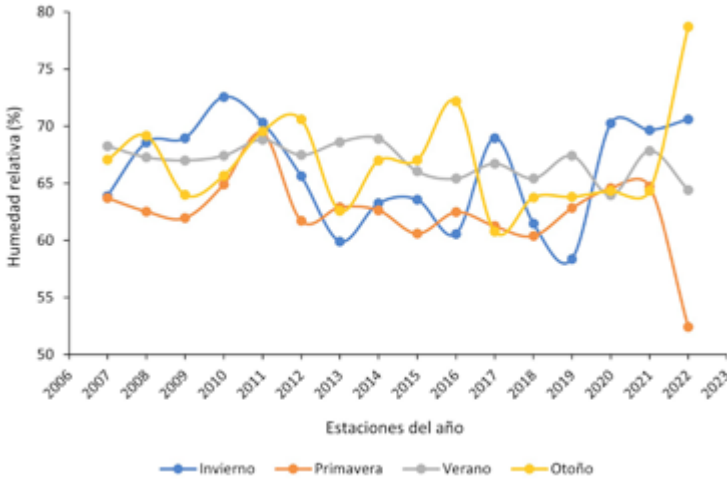


Figura 9.20. Valores promedio anuales de precipitación y medias móviles a tres años MM3 frente al tiempo en Valencia.

Tabla 9.17. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de precipitaciones acumuladas y sus medias móviles MM3 frente al tiempo en Valencia.
P: precipitación acumulada (mm); P_{MM3} : precipitación MM3 (mm); *t*: tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R ²	Incremento de la precipitación en 22 años (mm)
Precipitación	Lineal	$P=0,1331t+225,93$	0,00003	3,3
HR_{MM3}	Lineal	$HR=-0,3027t-676,6$	0,6138	

La figura 9.21 muestra las curvas obtenidas a partir de los valores medios de precipitación frente al tiempo para las cuatro estaciones del año. No se observa una tendencia estacional anual clara ya que se identifican máximos anuales en las cuatro estaciones del año, si bien las mayores acumulaciones de precipitación parecen registrarse en otoño. La tabla 9.18 muestra las curvas de regresión lineal calculadas que ponen de manifiesto que en verano y otoño se ha seguido una tendencia interanual lineal ligeramente decreciente mientras que en invierno y primavera ha sucedido lo contrario.

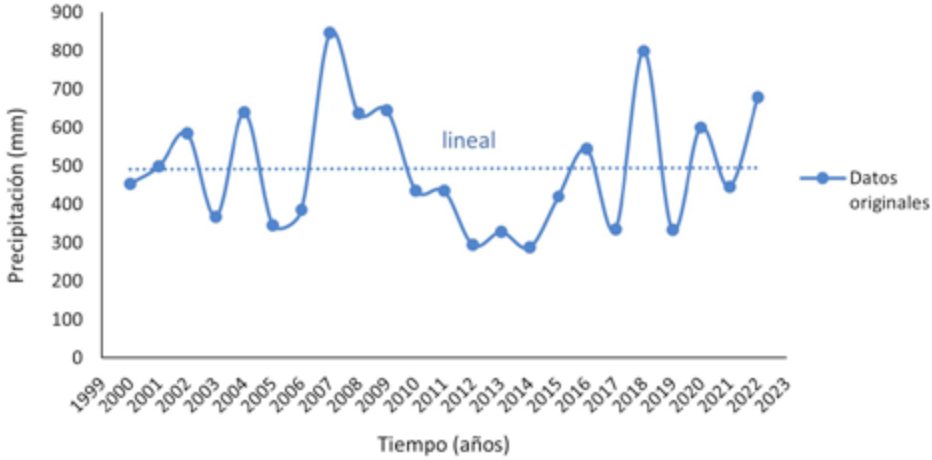


Figura 9.21. Valores promedio de precipitación frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Valencia.

Tabla 9.18. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de precipitaciones frente al tiempo en Valencia para las cuatro estaciones del año. *P*: precipitación (mm); *t*: tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Variación de la precipitación en 22 años (mm)
Verano	Lineal	$P = -0,4001t + 899,76$	-8,8
Primavera	Lineal	$P = 1,3397t - 2585,6$	29,5
Otoño	Lineal	$P = -0,5085t + 1190$	-11,2
Invierno	Lineal	$P = 1,3544t - 2609,6$	29,8

9.2.2. Calidad del aire

Concentración de SO₂

La figura 9.22 muestra la curva de concentración media anual de SO₂ en el aire frente al tiempo. Cabe señalar, en primer lugar, que el rango de concentraciones registradas para este contaminante es muy bajo y está claramente alejado del valor 12 µg m⁻³ fijado como máximo valor de concentración en la categoría C2 de corrosividad baja según la norma UNE-EN ISO 9223:2012. Asimismo, los valores registrados están por debajo del umbral de tolerancia, establecido por el Ministerio de Cultura (2009) en 10 µg m⁻³, para la conservación de bienes culturales en ambientes interiores. Dichos umbrales no han

sido superados en todo el periodo histórico registrado. La tabla 9.19 muestra la función de regresión parabólica convexa calculada para la concentración en aire de SO₂ frente al tiempo en el periodo 2007-2022. Asimismo, se han calculado las medias móviles a tres años, cuya curva y ajuste de regresión se muestran, también, en la figura 9.22 y en la tabla 9.19. Se puede observar una ligera depresión en los años 2010 a 2015, y la subsiguiente ascensión de los valores, a partir de 2016, hasta el presente. El valor calculado para el promedio interanual en el periodo 2007-2022 es 3,1±0,8 µg m⁻³. La descomposición de los datos obtenidos en promedios para cada estación y año no muestra diferencias estacionales significativas en los valores de concentración de SO₂ (gráficas no mostradas).

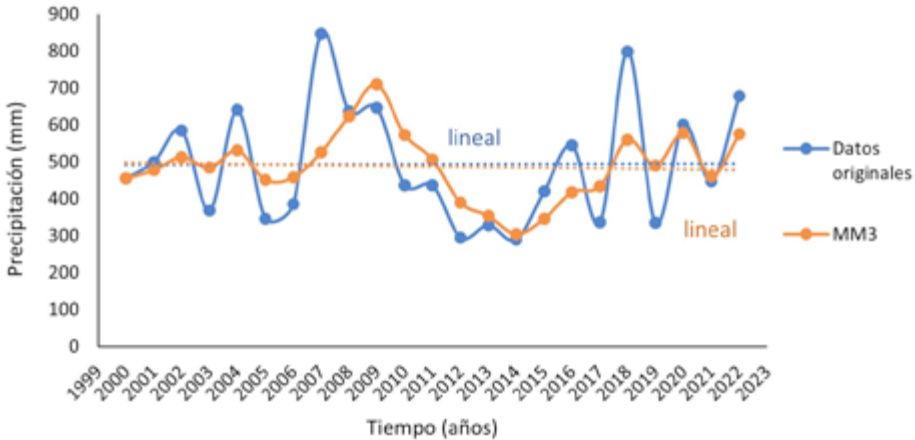


Figura 9.22 Valores promedio anuales de concentración de SO₂ frente al tiempo en Valencia.

Tabla 9.19. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de concentración de SO₂ frente al tiempo en Valencia. C_{SO₂}: concentración de SO₂ (µg m⁻³); C_{SO₂ MM3}: concentración de SO₂ MM3 (µg m⁻³); t: tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R ²
Concentración de SO ₂	Polinómica orden 2 convexa	$C_{SO_2} = -0,0243t^2 - 98,065t - 98746$	0,2375
Medias móviles (MM3)	Polinómica orden 2 convexa	$C_{SO_2 MM3} = 0,0331t^2 - 133,32t + 134387$	0,9551

Concentración de NO₂

La figura 9.23 muestra la curva de concentración media anual de NO₂ en el aire frente al tiempo. La concentración de este contaminante ha disminuido considerablemente con

tendencia exponencial decreciente desde las primeras mediciones realizadas en 2007 y sucediéndose una serie de ciclos irregulares. De 2007 a 2016, la concentración de NO_2 se ha mantenido en el intervalo $25\text{-}85 \mu\text{g m}^{-3}$ correspondiente a la categoría C3 de corrosividad moderada según la norma UNE-EN ISO 9223:2012. A partir de 2016 se sitúa por debajo de $25 \mu\text{g m}^{-3}$ pasando a la categoría C2 de corrosividad baja. Pese a ello, la concentración de NO_2 todavía no se acaba de estabilizar por debajo del umbral de tolerancia, en ambientes interiores, de $10 \mu\text{g m}^{-3}$. En la figura 9.23 se puede observar que, en los dos últimos años, se registrado valores promedio anuales de 9,2 y $12,1 \mu\text{g m}^{-3}$. En la tabla 9.20 se muestra la ecuación obtenida para la función de regresión exponencial calculada para la concentración en aire de NO_2 frente al tiempo en el periodo 2007-2022.

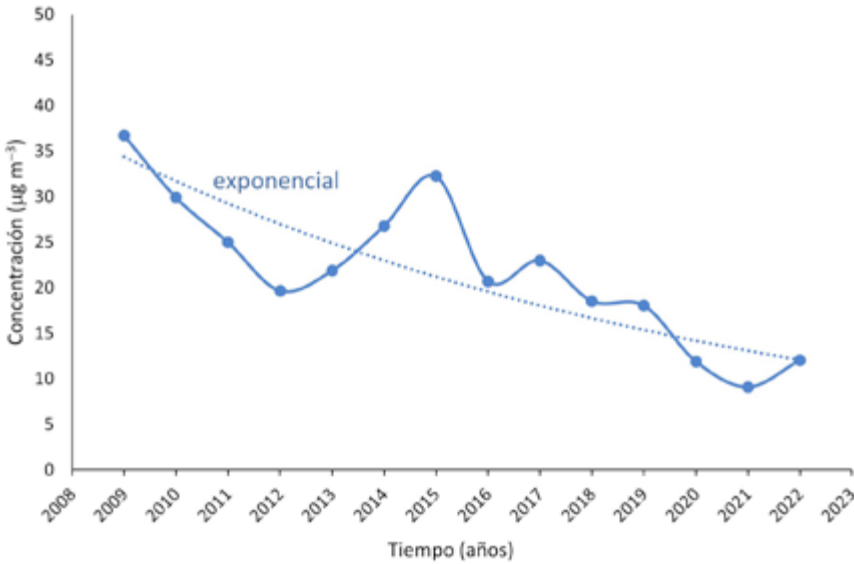


Figura 9.23. Valores promedio anuales de concentración de NO_2 frente al tiempo en Valencia.

Tabla 9.20. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de concentración de NO_2 frente al tiempo en Valencia. C_{NO_2} : concentración de NO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$); t : tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R^2
Concentración de NO_2	Exponencial	$C_{\text{NO}_2} = 5.10^{70} \cdot e^{-0,08t}$	0,7070

La serie de los valores de concentración de NO_2 en promedios anuales por estaciones se muestra en la figura 9.24. Se observa que las curvas representadas para las cuatro estaciones del año siguen el mismo perfil cíclico irregular y la misma tendencia interanual exponencial que las medias anuales. La representación de los datos de acuerdo con las estaciones del año muestra que los valores más altos de concentración se registraron en la estación de otoño seguida del invierno, que ostentó máximos anuales en 2017, 2019, 2020 y 2022. Los valores de concentración disminuyen en primavera y presentan mínimos

en el verano, con alguna alternancia entre ambas estaciones. La tabla 9.21 muestra las funciones de regresión obtenidas para las curvas estacionales. El diagrama de barras de la figura 9.25 muestra los valores promedio de concentración estacional de concentración de NO₂ para el periodo 2007-2022. Este diagrama muestra que, en general, durante el periodo en estudio se ha mantenido el ciclo estacional con el máximo situado en otoño seguido del invierno, la primavera y finalmente el verano.

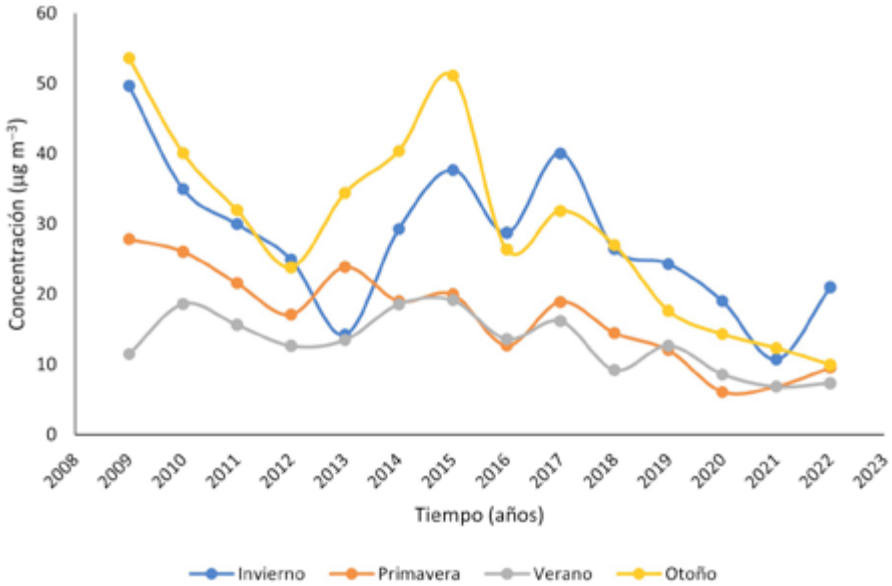


Figura 9.24. Valores promedio de concentración de NO₂ frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Valencia.

Tabla 9.21. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios para las cuatro estaciones del año de concentración de NO₂ frente al tiempo en Valencia. C_{NO₂}: concentración de NO₂ (µg m⁻³); t: tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Variación de la concentración de NO ₂ en 14 años (µg m ⁻³)
Verano	Exponencial	$C_{NO_2} = 1,0^{49} \cdot e^{-0,055t}$	-47,6
Primavera	Exponencial	$C_{NO_2} = 4,0^{88} \cdot e^{-0,1t}$	-8,5
Otoño	Exponencial	$C_{NO_2} = 3,0^{91} \cdot e^{-0,103t}$	-19
Invierno	Exponencial	$C_{NO_2} = 9,0^{48} \cdot e^{-0,054t}$	-29

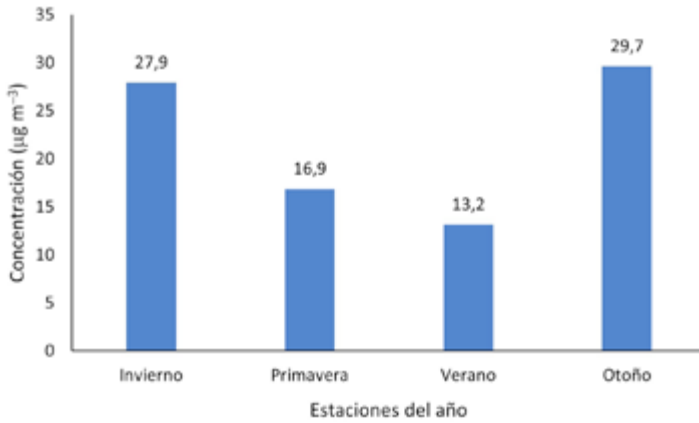


Figura 9.25. Diagrama de barras mostrando los valores promedio de concentración de NO₂ para las cuatro estaciones del año en Valencia durante el periodo 2007-2022.

Concentración de O₃

Los valores promedio anuales de concentración del contaminante O₃ registrados en Valencia se presentan en la figura 9.26, junto con las medias móviles calculadas a tres años (MM3). Ambas curvas han sido sometidas a un proceso de regresión que ha permitido obtener funciones de tipo lineal para la tendencia interanual, cuyas ecuaciones, con no muy buenos ajustes, figuran en la tabla 9.22. Los datos originales presentan una sucesión de ciclos irregulares, durante el periodo completo 2007-2022, en los que la concentración de O₃ ha experimentado variaciones en el intervalo 50-60 µg m⁻³, siendo el valor promedio en el periodo completo 55±5 µg m⁻³. Estos ciclos superpuestos son la causa de la mala calidad del ajuste de regresión lineal. Las gráficas obtenidas ponen de manifiesto que la concentración de ozono ha venido incrementándose y ha estado muy por encima del umbral de tolerancia establecido por Ministerio de Cultura (2009) (2 µg m⁻³ en ambientes interiores) durante el periodo completo en estudio.

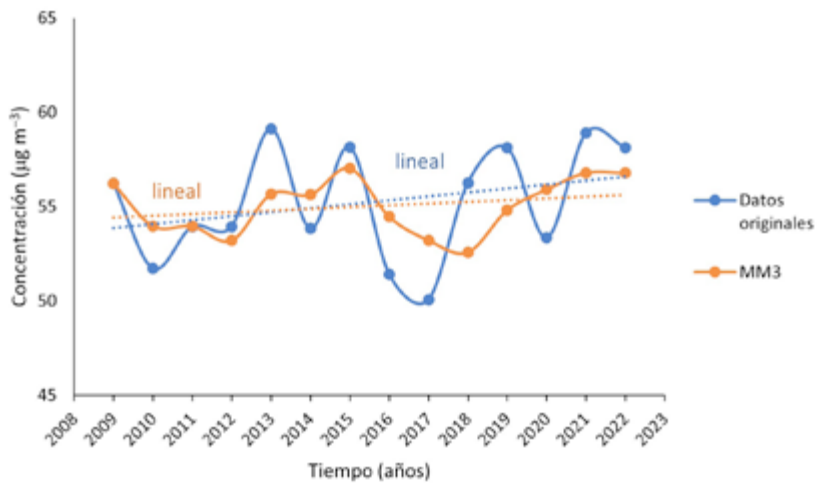


Figura 9.26. Valores promedio anuales de concentración de O₃ frente al tiempo en Valencia.

Tabla 9.22. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de concentración de O_3 frente al tiempo en Valencia y sus medias móviles. C_{O_3} : concentración anual de O_3 ($\mu g\ m^{-3}$); C_{O_3MM3} : concentración MM3 de O_3 ($\mu g\ m^{-3}$); t : tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R^2
Datos originales de concentración de O_3	Lineal	$C_{O_3}=0,2095t-367,1$	0,0843
Medias móviles de concentración de O_3	Lineal	$C_{O_3}=0,1523t-251,8$	0,1133

La serie de los valores medios anuales de concentración de O_3 para cada una de las estaciones del año se muestra en la figura 9.27. Se observa que las curvas representadas siguen la misma tendencia interanual que la gráfica de medias anuales. Las gráficas estacionales muestran cómo este contaminante presenta los mayores valores de concentración en las estaciones de primavera y verano, que son las más cálidas y con mayor insolación, lo que hace aumentar el índice de UV. Las curvas obtenidas presentan ajustes lineales cuyas ecuaciones se indican en la tabla 9.23. El diagrama de barras de la figura 9.28 resume los valores promedio de concentración estacional de O_3 para 2007-2022. Esta figura permite establecer un ciclo estacional anual promediado para el periodo temporal en estudio que presenta el máximo en primavera seguida del verano, invierno y, por último y con el valor mínimo, otoño.

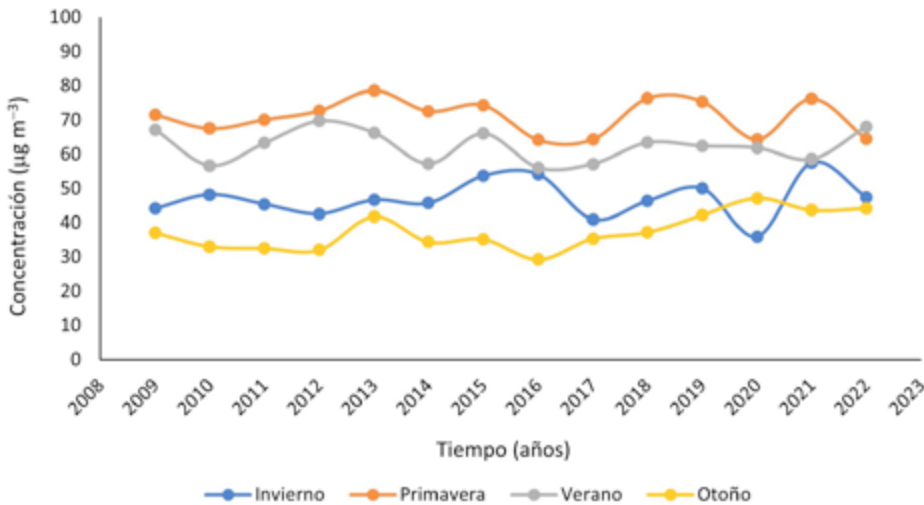
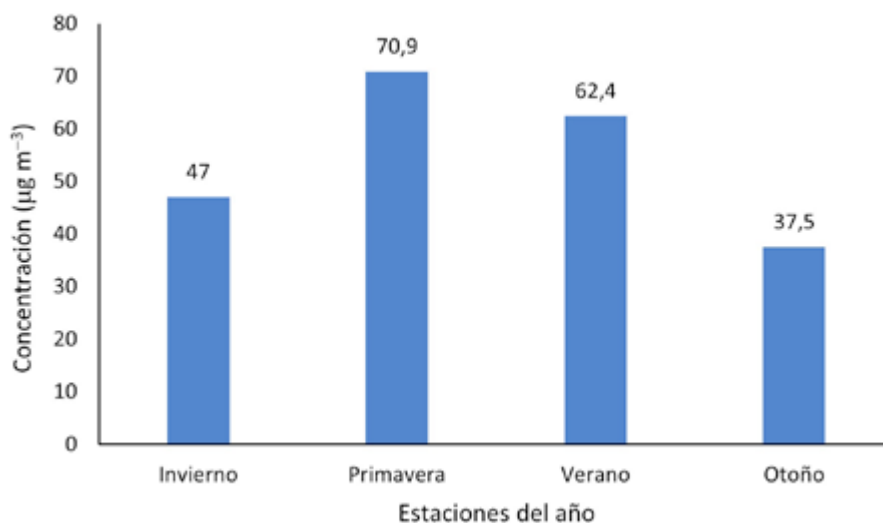


Figura 9.27. Valores promedio de concentración de O_3 frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Valencia.

Tabla 9.23. Valores promedio de concentración de O_3 frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Valencia. C_{O_3} : concentración de O_3 ($\mu g m^{-3}$); t : tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Variación de la concentración de O_3 en 14 años ($\mu g m^{-3}$)
Verano	Lineal	$C_{O_3} = -0,1227t - 309,72$	-1,7
Primavera	Lineal	$C_{O_3} = -0,1677t - 408,87$	-2,4
Otoño	Lineal	$C_{O_3} = -0,8484t - 1672,5$	-11,9
Invierno	Lineal	$C_{O_3} = -0,2158t - 387,81$	-3,0

**Figura 9.28.** Diagrama de barras mostrando los valores promedio de concentración de O_3 para las cuatro estaciones del año en Valencia durante el periodo 2007-2022.

Concentración de $PM_{2,5}$

Los promedios anuales de la concentración de las partículas $PM_{2,5}$ representados frente al tiempo se muestran en la figura 9.29. El análisis de regresión permite ajustar bien esta curva a una función de tipo polinómico de orden 2 (parabólica convexa) cuya ecuación se presenta en la tabla 9.24. Los datos registrados indican que en Valencia las emisiones de partículas han tenido una tendencia decreciente hasta 2013 seguida de un periodo de diez años (2013-2022) con fluctuaciones cíclicas de mayor amplitud y con cierta tendencia creciente, si bien, todavía no está bien definida. Los valores registrados, por tanto, se mantienen en el intervalo $10-30 \mu g m^{-3}$ correspondiente a la categoría C3 de

corrosividad baja según la norma UNE-EN ISO 9223:2012 y muy por debajo del valor $75 \mu\text{g m}^{-3}$ fijado por la US National Information Standards Organization (Upham, 1992) como umbral tolerable en interiores y lugares resguardados.

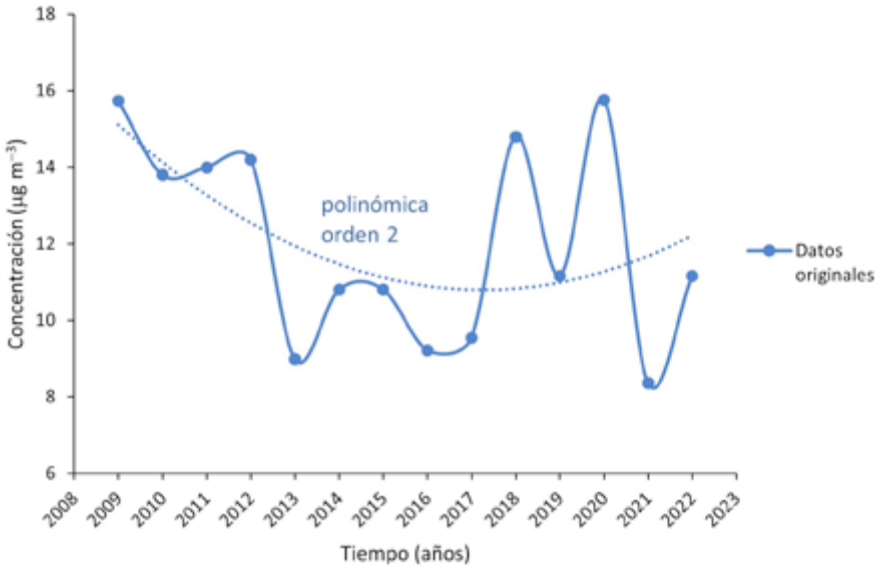


Figura 9.29. Valores promedio anuales de concentración de PM_{2,5} frente al tiempo en Valencia.

Tabla 9.24. Función y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de concentración PM_{2,5} frente al tiempo en Valencia. $C_{PM_{2,5}}$: concentración de PM_{2,5} ($\mu\text{g m}^{-3}$); t : tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R^2
Datos originales de concentración de PM _{2,5}	Polinómica	$C_{PM_{2,5}} = 0,0818t^2 - 329,94t - 332689$	0,7494

La serie de los valores de concentración de PM_{2,5} promediados para cada estación y año representados frente al tiempo se muestra en la figura 9.30 en la que se observa que las curvas obtenidas para las cuatro estaciones del año siguen la misma tendencia interanual que la gráfica de medias anuales. No se aprecia una secuencia estacional clara habiendo alternancia de máximos anuales para las diferentes estaciones. Las curvas obtenidas presentan ajustes parabólicos cuyas ecuaciones se indican en la tabla 9.25. El diagrama de barras de la figura 9.31 resume los valores promedio de concentración estacional de PM_{2,5} para 2007-2022 y permite establecer una secuencia estacional anual con valores decrecientes de concentración en el orden invierno, verano, otoño y primavera.

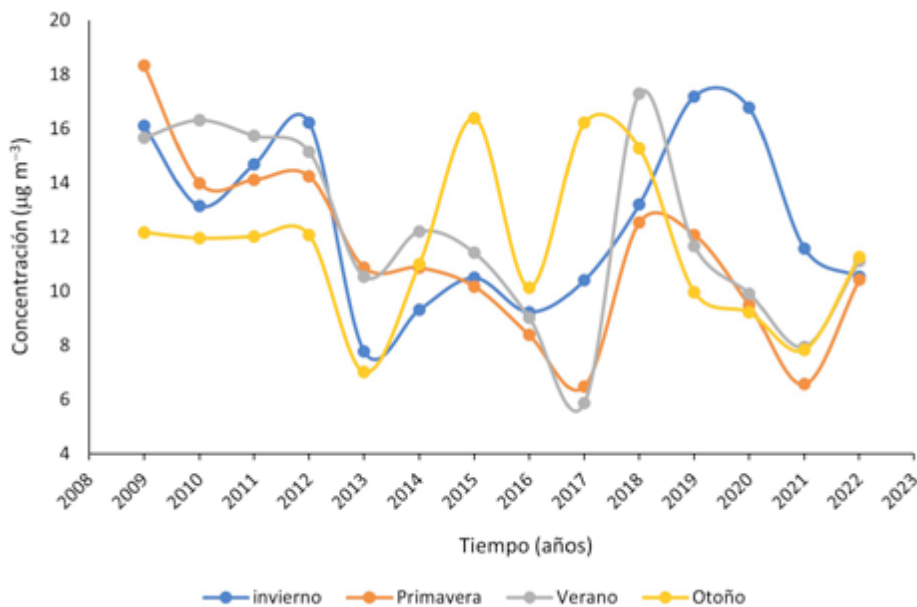


Figura 9.30. Valores promedio de concentración de PM2,5 frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Valencia.

Tabla 9.25. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios para las cuatro estaciones del año de concentración de PM2,5 frente al tiempo en Valencia. $C_{PM2,5}$: concentración de PM2,5 ($\mu\text{g m}^{-3}$); t : tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Variación de la concentración de PM2,5 en 14 años ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Verano	Polinómica orden 2	$C_{PM2,5} = 0,0594t^2 - 239,99t + 242339$	-7,13
Primavera	Polinómica orden 2	$C_{PM2,5} = 0,086t^2 - 347,14t + 350390$	-6,16
Otoño	Polinómica orden 2	$C_{PM2,5} = -0,0498t^2 + 200,67t - 202114$	-0,96
Invierno	Polinómica orden 2	$C_{PM2,5} = 0,0788t^2 - 317,7t + 320250$	-0,74

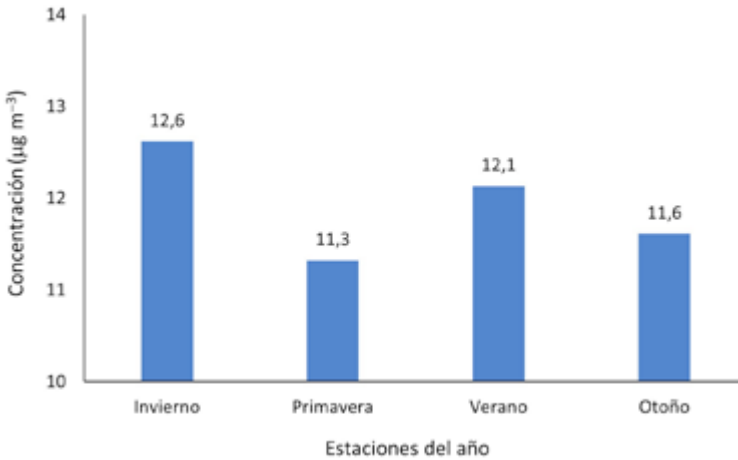


Figura 9.31. Diagrama de barras mostrando los valores promedio de concentración de PM_{2,5} para las cuatro estaciones del año en Valencia durante el periodo 2007-2022.

Concentración de PM₁₀

Los promedios anuales de la concentración de las partículas PM₁₀ y de sus medias móviles MM₃, representados frente al tiempo, se muestran en la figura 9.32. El análisis de regresión de los valores promedio y de las medias móviles ha permitido ajustar bien estas curvas a funciones de tipo polinómico de orden 2 (parabólica convexa) cuyas ecuaciones se presentan en la tabla 9.26. Los datos registrados indican que en Valencia las emisiones de partículas han seguido una tendencia decreciente subyacente a fluctuaciones cíclicas irregulares de cuatro a cinco años. Los valores registrados se mantienen en el intervalo 10-30 µg m⁻³ correspondiente a la categoría C3 de corrosividad baja según la norma UNE-EN ISO 9223:2012 y muy por debajo del valor 75 µg m⁻³ fijado por la US National Information Standards Organization (Upham, 1992) como umbral tolerable en interiores y lugares resguardados.

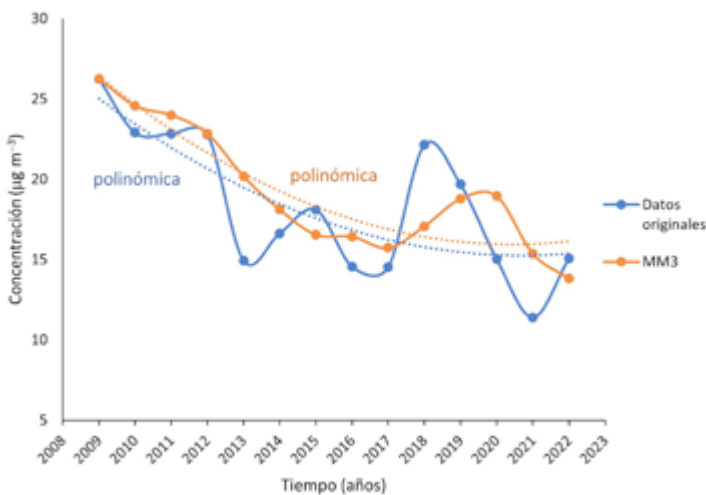


Figura 9.32. Valores promedio anuales de concentración de PM₁₀ frente al tiempo en Valencia.

Tabla 9.26. Función y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de concentración PM10 frente al tiempo en Valencia. C_{PM10} : concentración de PM10 ($\mu\text{g m}^{-3}$); $C_{PM10MM3}$: concentración de PM10 ($\mu\text{g m}^{-3}$); t : tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R^2
Datos originales	Polinómica orden 2	$C_{PM10}=0,0711t^2-287,37-290359$	0,7494
MM3	Polinómica Orden 2	$C_{PM10MM3}=0,0542t^2-219,07-221281$	0,8450

La serie de datos promedio anuales para cada estación de los valores de concentración de PM10 se muestra en la figura 9.33 en la que se observa que las curvas representadas de promedios para las cuatro estaciones del año siguen la misma tendencia interanual que la gráfica de medias anuales. Las ecuaciones correspondientes a los ajustes parabólicos se indican en la tabla 9.27. La representación de los datos de acuerdo con las estaciones del año muestra que este contaminante no presenta una tendencia estacional definida observándose máximos anuales en las cuatro estaciones del año. El diagrama de barras de la figura 9.34 resume los valores promedio de concentración estacional de PM10 para 2007-2022. Este gráfico permite establecer una tendencia estacional anual promedio con el máximo en verano, un máximo secundario en invierno, valor moderado en otoño y mínimo anual en primavera.

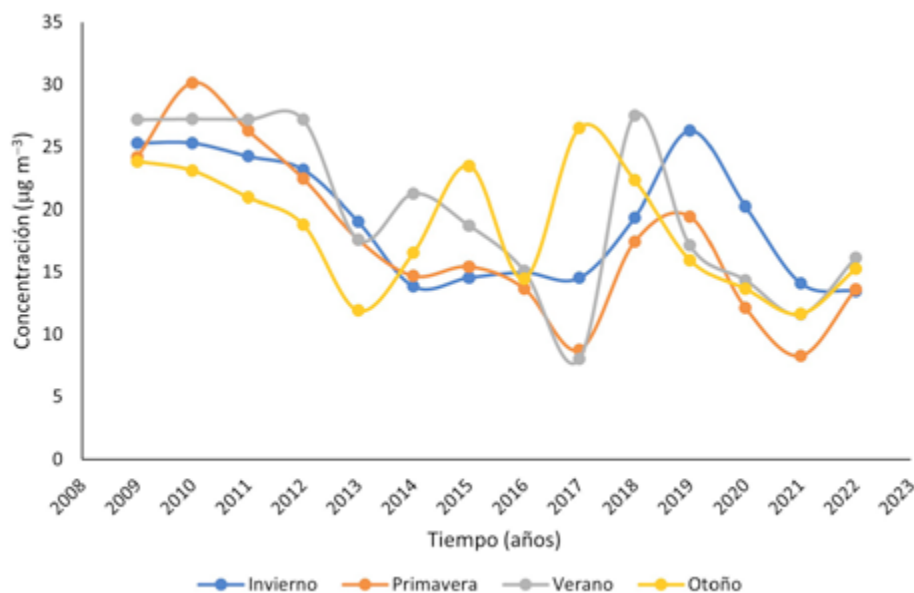


Figura 9.33. Valores promedio de concentración de PM10 frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Valencia.

Tabla 9.27. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios de concentración de PM10 frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Valencia.
 C_{PM10} : concentración de PM10 ($\mu\text{g m}^{-3}$); t : tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Variación de la concentración de PM10 en 14 años ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Verano	Polinómica orden 2	$C_{PM10}=0,0882t^2-356,69t+360574$	-15,03
Primavera	Polinómica orden 2	$C_{PM10}=0,1247t^2-503,94t+509069$	-16,57
Otoño	Polinómica orden 2	$C_{PM10}=-0,0171t^2+68,295t-68252$	-8,32
Invierno	Polinómica orden 2	$C_{PM10}=0,0988t^2-398,8t+402544$	-6,99

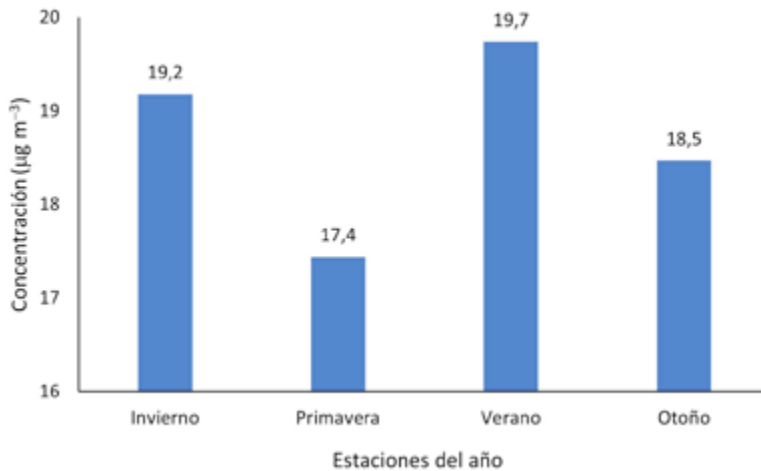


Figura 9.34. Diagrama de barras mostrando los valores promedio de concentración de PM10 para las cuatro estaciones del año en Valencia durante el periodo 2007-2022.

9.4 Vilafranca del Cid

9.4.1. Meteorología

Temperatura

La figura 9.35 presenta la gráfica de los promedios anuales de temperatura en Vilafranca del Cid frente al tiempo en el periodo 2007 a 2022. La tendencia lineal interanual que subyace a una serie de ciclos irregulares tiene una pendiente positiva, indicativa de un incremento progresivo de $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a lo largo de estas dos últimas décadas. La temperatura media calculada desde el año de 2007 hasta 2022 es $12\pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$. La ecuación de la función de regresión calculada para los últimos 14 años, se muestra en la tabla 9.28, donde también se incluye la magnitud de la variación de temperatura para el periodo completo.

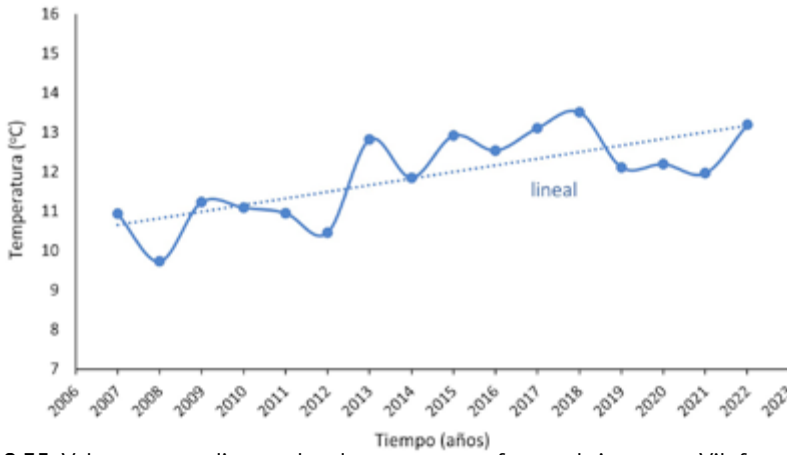


Figura 9.35. Valores promedio anuales de temperatura frente al tiempo en Vilafranca del Cid.

Tabla 9.28. Funciones y coeficiente de regresión calculados para el promedio anual de temperatura frente al tiempo en Vilafranca del Cid. T : temperatura (°C); t : tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R^2	Incremento de la temperatura en 14 años (°C)
Temperatura	Lineal	$T=0,1676t-325,79$	0,5352	2,4

El comportamiento de la temperatura se puede ilustrar más detalladamente a través del estudio de los correspondientes valores medios anuales en cada estación del año, representados gráficamente en la figura 9.36. Estas series temporales permiten confirmar que las temperaturas en verano y primavera son las más elevadas del año seguidas del otoño e invierno. Las curvas de tendencia lineal calculadas indican que, en todas las estaciones hay un progresivo incremento de temperatura, que presenta los mayores valores a lo largo de los últimos 14 años en las estaciones de verano y primavera (tabla 9.29).

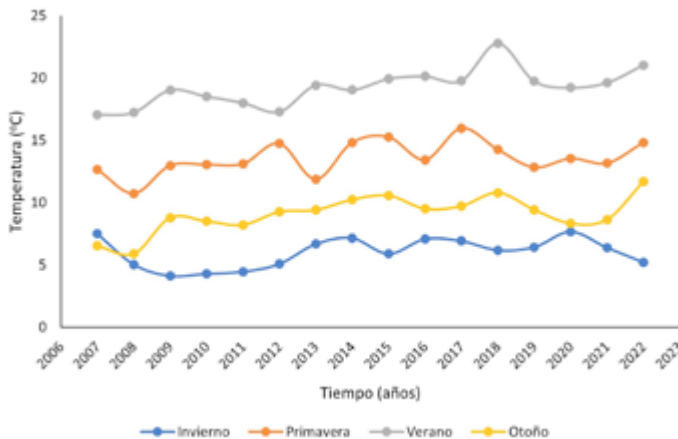


Figura 9.36. Valores promedio de temperatura frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Vilafranca del Cid.

Tabla 9.29. Funciones y coeficiente de regresión calculados para el promedio de los datos de temperatura en cada estación frente al tiempo en Vilafranca del Cid. T : temperatura (°C); t : tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Incremento de la temperatura media estacional en 14 años (°C)
Verano	Lineal	$T=2253t-434,58$	3,2
Primavera	Lineal	$T=0,1208t-229,82$	1,7
Otoño	Lineal	$T=0,2022t-398,16$	2,8
Invierno	Lineal	$T=0,0922-179,71$	1,3

Humedad relativa

En la figura 9.37 se representan gráficamente, frente al tiempo, los valores de humedad relativa media anual registrados durante los años 2007 a 2022 en Vilafranca del Cid. La tendencia de la serie superpuesta a los ciclos irregulares y, determinada mediante regresión lineal (tabla 9.30), muestra un comportamiento ligeramente creciente durante el periodo completo 2007-2022, siendo el incremento neto 5,5 %. El valor promedio de la HR calculado para el periodo completo 2007-2022 es 70 ± 9 %.

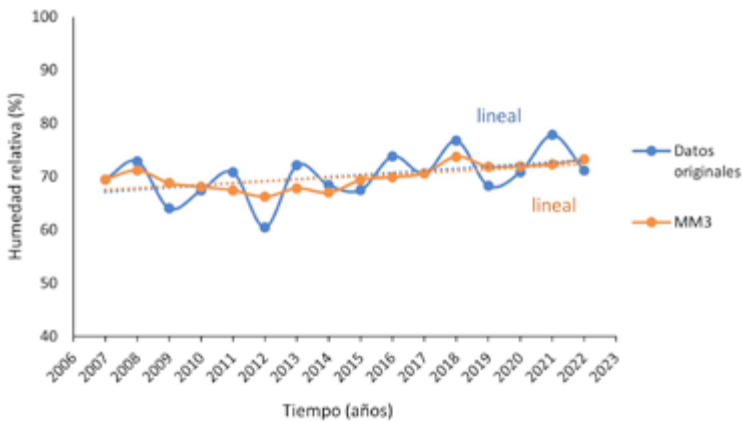


Figura 9.37. Valores promedio anuales de HR frente al tiempo en Vilafranca del Cid.

Tabla 9.30. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de HR frente al tiempo en Vilafranca del Cid. HR : humedad relativa (%); HR_{MM3} : humedad relativa MM3 (%); t : tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R^2	Incremento de la HR en 14 años (%)
Datos originales	Lineal	$HR=0,3952t-726$	0,1876	5,5
MM3	Lineal	$HR=0,5898t-1117$	0,9016	7,7

El comportamiento de los valores medios anuales de HR se comprende mejor mediante el estudio de los valores medios anuales para las cuatro estaciones del año, representados gráficamente en la figura 9.38. La descomposición de las series temporales en sus componentes muestra que la HR ha estado sujeta a fluctuación cíclica durante las cuatro estaciones del año. Las curvas de tendencia lineal calculadas indican que las estaciones de primavera, verano y, especialmente, otoño han tenido una tendencia creciente, mientras que el invierno, contrariamente, ha experimentado una tendencia decreciente. Los resultados obtenidos en el tratamiento por regresión lineal y los incrementos de HR, calculados para el periodo 2007-2022 en las cuatro estaciones del año, se listan en la tabla 9.31. Cabe resaltar el importante incremento de 11,9 % habido en el otoño.

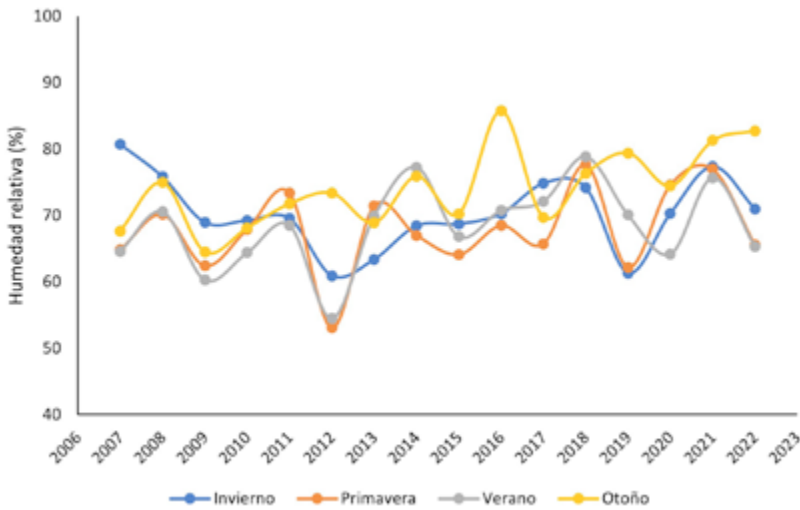


Figura 9.38. Valores promedio de HR frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Vilafranca del Cid.

Tabla 9.31. Funciones y coeficiente de regresión calculados para el promedio de los datos de HR frente al tiempo para cada estación en Vilafranca del Cid. HR: humedad relativa (%); t: tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Variación de la HR en 14 años (%)
Verano	Lineal	$HR=0,4747t-887,88$	6,7
Otoño	Lineal	$HR=0,8507t-1639,6$	11,9
Invierno	Lineal	$HR=-0,0873t+246,16$	-1,2

Precipitaciones

En la figura 9.39 se representan gráficamente frente al tiempo los valores de precipitación media anual registrados durante los años 2007 a 2022 en Vilafranca del Cid. La curva de la serie histórica presenta una forma muy irregular debido a la serie de ciclos cortos de unos pocos años que se van sucediendo a lo largo del periodo en estudio. En primera aproximación se aprecia el periodo 2007-2013, con tendencia decreciente, en el que se pasó de acumular 1389 mm año⁻¹ en 2007 a solo 181 mm año⁻¹ en 2013. A este periodo le sucedió otro con tendencia netamente creciente alcanzando la tasa máxima en 2020 con 1600 mm año⁻¹. Se ha aplicado el método no determinista de las medias móviles a tres años para determinar la tendencia cuya gráfica también se muestra en la figura 9.39. Las funciones obtenidas por regresión polinómica de segundo orden (parabólica convexa) en ambas curvas de datos originales y MM3 se muestran en la tabla 9.32. El valor promedio de la precipitación, calculado para el periodo completo 2007-2022 es 800±400mm.

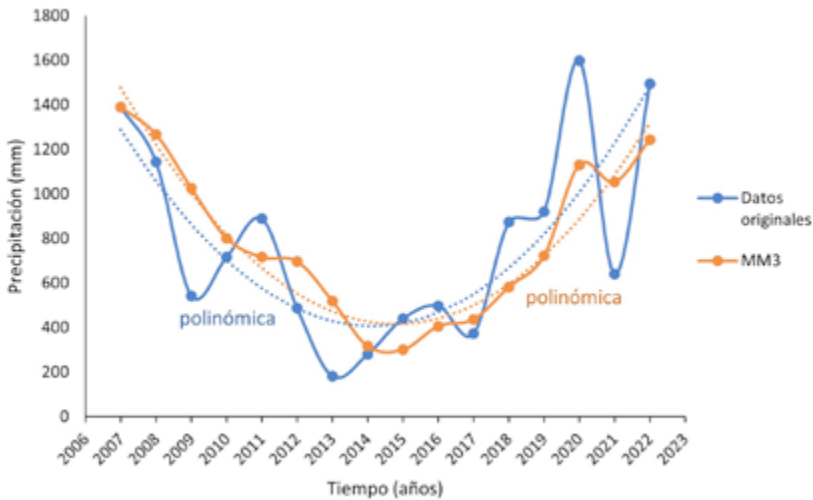


Figura 9.39. Valores promedio anuales de precipitación frente al tiempo en Vilafranca del Cid.

Tabla 9.32. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de precipitaciones frente al tiempo en Vilafranca del Cid. *P*: precipitación acumulada (mm); *P*_{MM3}: precipitación acumulada (mm); *t*: tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R ²	Incremento de la precipitación en 14 años (mm)
Precipitación	Polinómica orden 2	$P=17,371t^2-69974t+7 \cdot 10^7$	0,6237	105
MM3	Polinómica orden 2	$P=19,758t^2-79604t+8 \cdot 10^7$	0,9422	122,1

La figura 9.40 muestra las curvas obtenidas a partir de los valores medios de precipitación frente al tiempo para las cuatro estaciones del año. Se observa que las precipitaciones también han estado sujetas a fluctuaciones cíclicas durante las cuatro estaciones del año. En todas las estaciones se constata una tendencia parabólica que, en primavera y otoño, estaciones preferentes de lluvia, se acentúa más, mientras que en verano e invierno la curva pierde excentricidad. Los resultados obtenidos en el tratamiento por regresión y los incrementos estacionales de HR calculados para el periodo 2007-2022 se listan en la tabla 9.33.

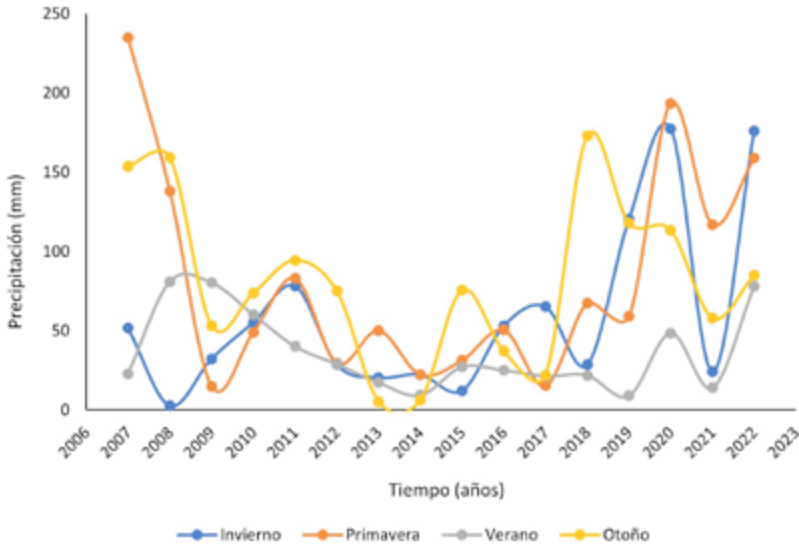


Figura 9.40. Valores promedio de precipitación frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Vilafranca del Cid.

Tabla 9.33. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios de precipitación frente al tiempo en cada estación del año en Vilafranca del Cid. *P*: precipitación (mm); *t*: tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Variación de la precipitación en 22 años (mm)
Verano	Polinómica orden 2	$P=0,6528t^2-2631,6t+3\cdot 10^6$	96,4
Primavera	Polinómica orden 2	$P=2,7708t^2-11163t+1\cdot 10^7$	8,3
Otoño	Polinómica orden 2	$P=1,3704t^2-5522,7t+6\cdot 10^6$	-22,03
Invierno	Polinómica orden 2	$P=1,0078t^2-4054t+4\cdot 10^6$	-20,4

9.4.2. Calidad del aire

Concentración de SO₂

La figura 9.41 muestra la curva de concentración media anual de SO₂ en el aire frente al tiempo. Cabe señalar que el rango de concentraciones registradas para este contaminante es muy bajo, situándose por debajo de los umbrales 12 y 10 µg m⁻³ fijados en la norma UNE-EN ISO 9223:2012 para la categoría C2 de corrosividad baja y por el Ministerio de Cultura (2009) en ambientes interiores y resguardados. La tabla 9.34 muestra la ecuación de la función de regresión polinómica de segundo orden (parabólica convexa) calculada para la concentración en aire de SO₂ frente al tiempo en el periodo 2007-2022. Si se examina el perfil de la curva se observa que presenta dos periodos. El primero de ellos, que se remonta a los años 2007 a 2013 con tendencia decreciente y el segundo de 2013 a 2022 con tendencia creciente. El promedio interanual para el periodo 2007-2022 es 4±2 µg m⁻³.

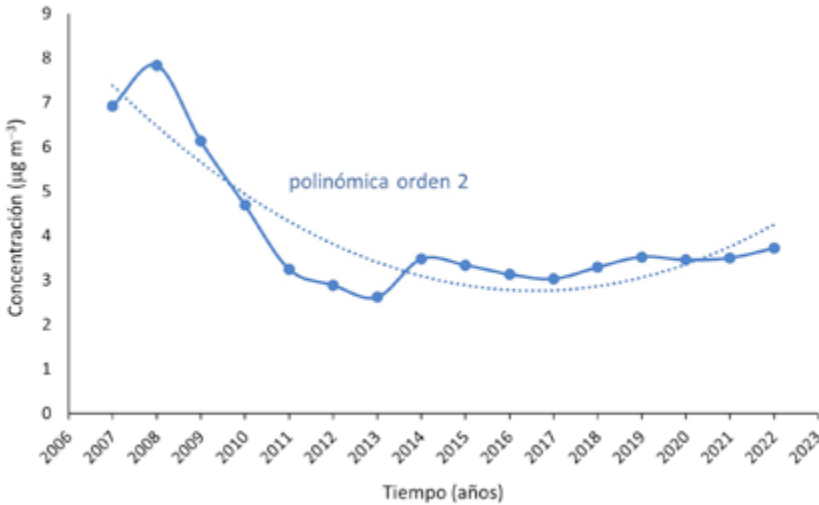


Figura 9.41 Valores promedio anuales de concentración de SO₂ frente al tiempo en Vilafranca del Cid.

Tabla 9.34. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de concentración de SO₂ frente al tiempo en Vilafranca del Cid. C_{SO₂}: concentración de SO₂ (µg m⁻³); t: tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R ²
Concentración de SO ₂	Polinómica orden 2	C _{SO₂} =0,0505t ² -203,62t+205310	0,8225

Concentración de NO₂

La figura 9.42 muestra la curva de concentración media anual de NO₂ en el aire frente al tiempo. En la tabla 9.35 se muestra la ecuación de la función de regresión potencial de

segundo orden (parabólica convexa) calculada para la concentración en aire de NO_2 frente al tiempo en el periodo 2007-2022. Se puede apreciar que la concentración en el aire de este contaminante ha disminuido considerablemente desde las primeras mediciones realizadas en 2007. Pese a ello, este contaminante solo se mantuvo por debajo del umbral de tolerancia para la conservación de bienes culturales en ambientes interiores de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ en el año 2021. La concentración promedio durante el periodo completo ha sido $6 \pm 3 \mu\text{g m}^{-3}$.

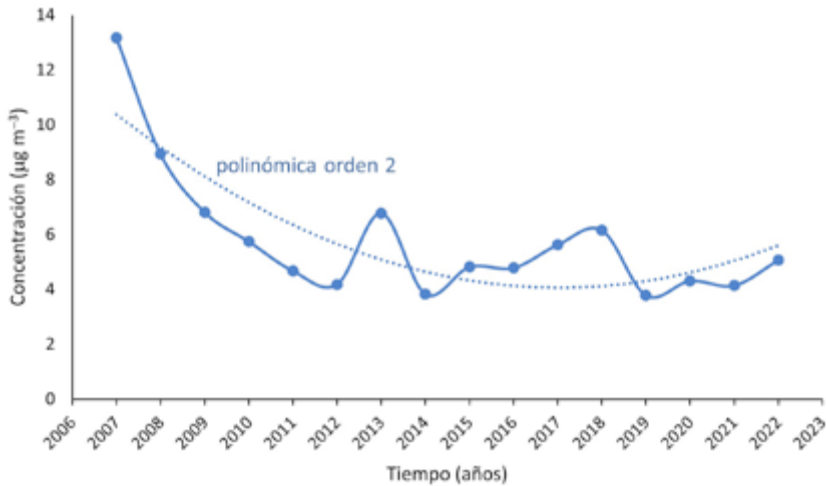


Figura 9.42 Valores promedio anuales de concentración de NO_2 frente al tiempo en Vilafranca del Cid.

Tabla 9.35. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de concentración de NO_2 frente al tiempo en Vilafranca del Cid. C_{NO_2} : concentración de NO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$); t : tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R^2
Concentración de NO_2	Potencial	$C_{\text{NO}_2}=0,0626t^2-252,61t+254770$	0,6636
	Orden 2		

La serie de los datos para cada estación (figura 9.43) revela fluctuaciones o ciclos interanuales de gran amplitud en invierno y algo menor en primavera y verano, siendo el otoño la estación que ha mantenido ciclos de menor intensidad siguiendo la tendencia parabólica interanual. La tabla 9.36 muestra las ecuaciones calculadas para las funciones de regresión polinómica obtenidas en cada estación del año. Los valores promedio de concentración de este contaminante para cada estación calculados para el periodo 2007-2022 se muestran en el diagrama de barras de la figura 9.44. A partir de estos datos puede establecerse una tendencia estacional anual promedio para el periodo 2007-2022 que se iniciaría en invierno, estación en la que se registran los máximos valores de concentración de este contaminante, e iría decreciendo progresivamente en primavera y verano hasta alcanzar valores mínimos en otoño.

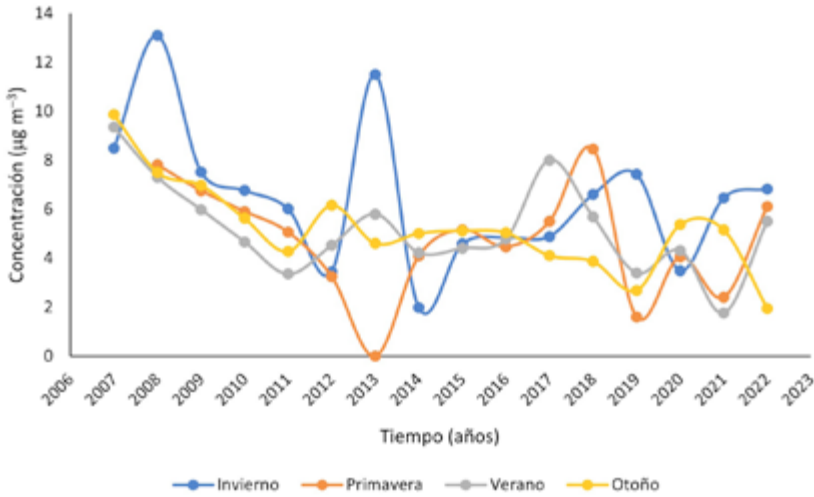


Figura 9.43. Valores promedio de concentración de NO₂ frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Vilafranca del Cid.

Tabla 9.36. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios de concentración de NO₂ frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Vilafranca del Cid. C_{NO₂}: concentración de NO₂ (µg m⁻³); t: tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Variación de la concentración de NO ₂ en 14 años (µg m ⁻³)
Verano	Polinómica grado 2	$C_{NO_2}=0,0251t^2-101,35t+102280$	-3,3315
Primavera	Polinómica grado 2	$C_{NO_2}=0,0449t^2-181,08t+182568$	-2,6685
Otoño	Polinómica grado 2	$C_{NO_2}=0,0279t^2-112,62t+113744$	-3,1635
Invierno	Polinómica grado 2	$C_{NO_2}=0,0604t^2-243,45t+245454$	-1,476

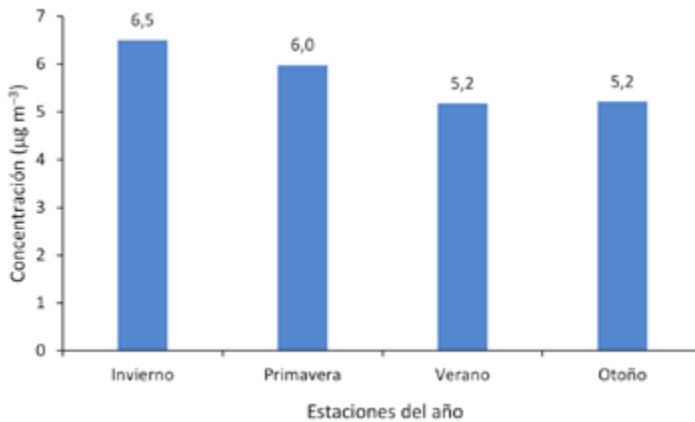


Figura 9.44. Diagrama de barras mostrando los valores promedio de concentración de NO₂ para las cuatro estaciones del año en Vilafranca del Cid durante el periodo 2007-2022.

Concentración de O_3

Los valores promedio anuales de concentración del contaminante O_3 registrados en Vilafranca del Cid se presentan en la figura 9.45 junto con las medias móviles calculadas a tres años (MM3). Ambas curvas de valores han sido sometidas a un proceso de regresión que ha permitido obtener funciones de tipo lineal para la tendencia interanual, tal como se resume en la tabla 9.37 en la que figuran las ecuaciones y el coeficiente de regresión al cuadrado. Se observa que durante el periodo 2007-2022 la concentración de O_3 ha experimentado variaciones cíclicas en el intervalo de 50-80 $\mu\text{g m}^{-3}$, siguiendo una tendencia ligeramente creciente, siendo el valor promedio en el periodo estudiado de $75 \pm 3 \mu\text{g m}^{-3}$. Este resultado pone de manifiesto que la concentración de ozono durante el periodo completo ha estado muy por encima del umbral de tolerancia para la conservación de bienes culturales en ambientes interiores, establecido por Ministerio de Cultura (2009) en $2 \mu\text{g m}^{-3}$.

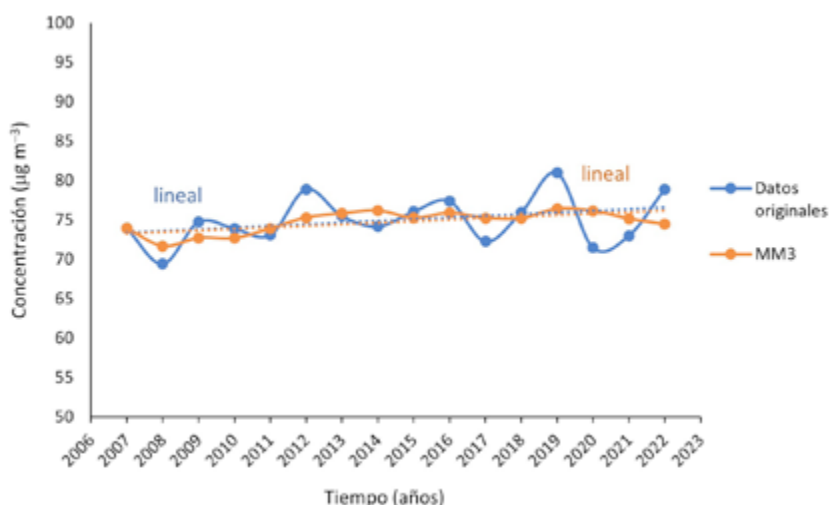


Figura 9.45. Valores promedio anuales de concentración de O_3 frente al tiempo en Vilafranca del Cid.

Tabla 9.37. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios anuales de concentración de O_3 frente al tiempo en Vilafranca del Cid. C_{O_3} : concentración anual de O_3 ($\mu\text{g m}^{-3}$); C_{O_3MM3} : concentración anual de O_3 ($\mu\text{g m}^{-3}$); t : tiempo (años).

Variable	Tipo de tendencia	Función de regresión	Coefficiente de regresión R^2
Datos originales de concentración de O_3	Lineal	$C_{O_3}=0,1264t-179,5$	0,1110
MM3	Lineal	$C_{O_3MM3}=0,1264t-179,5$	0,4198

La serie de los valores promedio de concentración de O_3 para cada estación se muestra en la figura 9.46 en la que se observa que las cuatro curvas de promedios siguen la misma tendencia interanual que la gráfica de medias anuales. Las curvas obtenidas presentan ajustes lineales cuyas ecuaciones se indican en la tabla 9.38. La representación de los

datos, de acuerdo con las estaciones del año, muestra una clara tendencia a registrarse los valores máximos anuales en primavera y los mínimos en otoño mientras que en verano se dan valores moderados con alguna alternancia del invierno. El diagrama de barras de la figura 9.47 resume los valores promedio de concentración estacional de O_3 para 2007-2022 y confirma dicha tendencia estacional anual a lo largo del periodo en estudio.

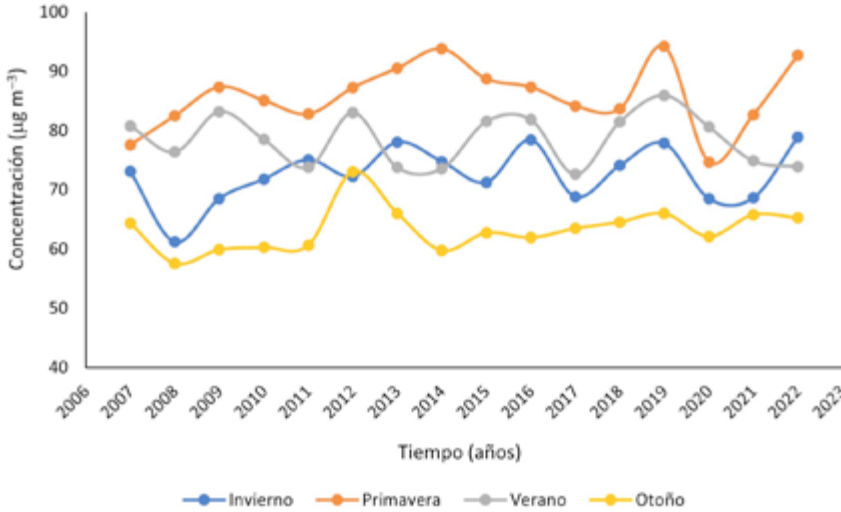


Figura 9.46. Valores promedio para las cuatro estaciones del año de concentración de O_3 frente al tiempo en Vilafranca del Cid.

Tabla 9.38. Funciones y coeficiente de regresión calculados para los promedios de concentración de O_3 frente al tiempo para las cuatro estaciones del año en Vilafranca del Cid. C_{O_3} : concentración de O_3 ($\mu\text{g m}^{-3}$); t : tiempo (años).

Estación	Tipo de tendencia	Función de regresión	Variación en 14 años ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Verano	Lineal	$C_{O_3}=0,0735t+226,63$	1,1025
Primavera	Lineal	$C_{O_3}=-0,2185t-354,2$	-3,2775
Otoño	Lineal	$C_{O_3}= 0,2452t-430,71$	3,678
Invierno	Lineal	$C_{O_3} = -0,2452t- 430,71$	-3,678

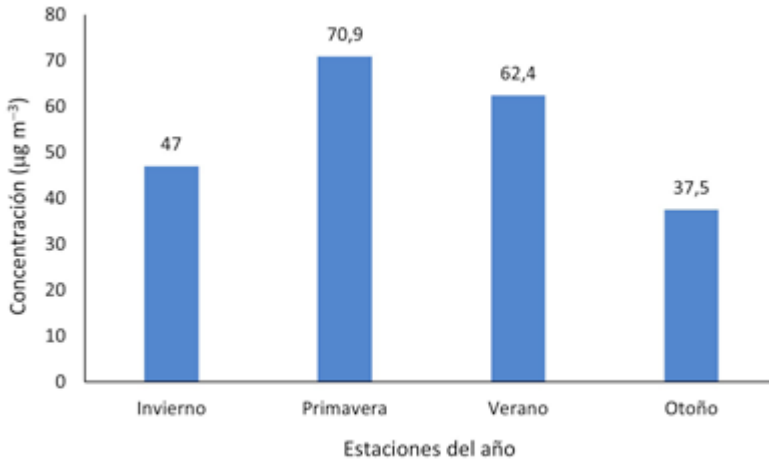


Figura 9.47. Diagrama de barras mostrando los valores de concentración de O_3 en Vilafranca del Cid promedio para las cuatro estaciones del año durante el periodo 2007-2022.

9.5. Estudio comparativo de las tres localizaciones

El estudio comparativo de las tres localizaciones se va a realizar desde la perspectiva de las implicaciones para la conservación de patrimonio ferrocarrilario metálico.

9.5.1. Meteorología

La tabla 9.39 resume los valores relevantes de las tendencias de las series de tiempo históricas de temperatura, humedad relativa y precipitaciones para las tres localidades estudiadas. Se ha considerado la temperatura promedio en el periodo 2007-2022 (T_{media}), la temperatura media anual máxima ($T_{máxima}$) y la correspondiente media anual mínima ($T_{mínima}$) en dicho periodo y la temperatura media anual en 2022 (T_{2022}), como referente cercano. También se incluyen en la tabla los correspondientes parámetros estadísticos para la humedad relativa (HR_{media} , $HR_{máxima}$, $HR_{mínima}$ y HR_{2022}) y para las precipitaciones anuales acumuladas (P_{media} , $P_{máxima}$, $P_{mínima}$ y P_{2022}). Además, se indica el tipo de tendencia identificada en la serie histórica.

La tendencia histórica de temperaturas presenta un perfil lineal creciente en las tres poblaciones. La temperatura media más alta la registra Valencia seguida de Pinoso y Vilafranca del Cid. La amplitud para el periodo en estudio 2007-2022 (diferencia entre el valor de temperatura máximo y mínimo registrado en el periodo $\Delta T = T_{max} - T_{min}$) ha sido de 3,7, 1,2 y 0,25 °C en Vilafranca del Cid, Valencia y Pinoso, respectivamente. En Pinoso y Valencia la temperatura máxima se ha alcanzado en el último año registrado, y en Vilafranca del Cid se sitúa en un año próximo a 2022. Todos estos datos, considerados en su conjunto, parecen indicar que el cambio climático puede estar afectando de manera más intensa a las poblaciones del interior mientras que en la costa el efecto se suaviza. Aunque los valores medios de temperatura anual se sitúan por debajo de 20 °C, cabe pensar que en una parte considerable del año se superará esta temperatura y que esta tendencia irá en aumento con el cambio climático, lo que supone un problema para la conservación de patrimonio ferrocarrilario.

La HR exhibe una tendencia lineal decreciente en Valencia y lineal creciente en Vilafranca del Cid. Las concentraciones medias son 67 y 70 % en Valencia y Vilafranca del Cid, respectivamente. En ambos casos, se trata de valores superiores al recomendado para la conservación de objetos metálicos (30 %). Vilafranca del Cid es la población que registra el valor promedio de HR_{\max} más elevado, $78 \mu\text{g m}^{-3}$. La máxima amplitud para el periodo se reporta en esta misma población ($\Delta HR=18 \%$). Puede concluirse, por tanto, que en relación a la HR es necesario llevar un control riguroso de las condiciones de exhibición y almacenaje de bienes culturales para minimizar los riesgos de daños para el patrimonio ferrotranviario en la Comunitat Valenciana, sobre todo si este se halla en un ambiente exterior.

Las precipitaciones exhiben una tendencia parabólico-convexa en Alcoi-Pinoso y Vilafranca del Cid y lineal creciente en Valencia. Los valores medios son 281, 281 y 494, respectivamente. Vilafranca del Cid reporta la máxima amplitud de $\Delta P=1600 \text{ mm}$.

Tabla 9.39. Valores medios y tipo de tendencia de las variables meteorológicas para las diferentes localidades en el periodo 2007-2022. *T*: temperatura (°C); *HR*: humedad relativa (%); *P*: precipitaciones (mm).

Población	Variable registrada				Tendencia 2007-2022
	T_{media}	$T_{\text{máxima}}$	$T_{\text{mínima}}$	T_{2022}	
Alcoi-Pinoso	15,0	16,3	13,8	16,3	Lineal creciente
Valencia	19,0	19,1	17,9	19,1	Lineal creciente
Vilafranca del Cid	12,0	13,5	9,8	13,0	Lineal creciente
Población	HR_{media}	$HR_{\text{máxima}}$	$HR_{\text{mínima}}$	HR_{2022}	Tendencia 2007-2022
	P_{media}	$P_{\text{máxima}}$	$P_{\text{mínima}}$	P_{2022}	
Alcoi-Pinoso	-	-	-	-	-
Valencia	67	72	62	62	Lineal decreciente
Vilafranca del Cid	70	78	60	70	Lineal creciente
Alcoi-Pinoso	281	530	100	390	Parabólica convexa
Valencia	281	850	300	690	Lineal creciente
Vilafranca del Cid	494	1600	200	1500	Parabólica convexa

La tabla 9.40 resume los valores relevantes de las tendencias de las series de tiempo históricas de contaminantes atmosféricos para las tres localidades estudiadas. Se ha considerado la concentración media en el periodo 2007-2022 ($C_{\text{contaminante media}}$), la concentración media anual máxima ($C_{\text{contaminante máxima}}$) y la correspondiente media anual mínima ($C_{\text{contaminante mínima}}$) en dicho periodo, así como la concentración media anual en 2022 ($C_{\text{contaminante 2022}}$). También se indica el tipo de tendencia identificada en la serie histórica.

La concentración de SO_2 presenta una tendencia histórica con perfil parabólico convexo en las tres poblaciones con concentraciones medias muy bajas, en torno a $3\text{-}4 \mu\text{g m}^{-3}$. Puede concluirse, por tanto, que las tres poblaciones tienen similares características respecto a este contaminante que presenta valores muy bajos que no suponen riesgo para la salud ni para la conservación de patrimonio ferroviario en la Comunitat Valenciana.

La concentración de NO_2 exhibe una tendencia parabólico convexa en Vilafranca del Cid y exponencial en Alcoi y Valencia. Las concentraciones medias superan el valor tolerable para bienes culturales conservados en interiores y lugares resguardados ($10 \mu\text{g m}^{-3}$) en Valencia y Alcoi y se sitúan en la categoría C3 de corrosividad moderada (UNE-EN ISO 9223:2012). Vilafranca del Cid se situaría en la categoría C2 de corrosividad baja al no superar los $12 \mu\text{g m}^{-3}$. De las tres localizaciones, Valencia es la población que registra el valor promedio interanual más elevado ($21,8 \mu\text{g m}^{-3}$). La máxima amplitud para el periodo se registra también en Valencia ($\Delta C_{\text{NO}_2} = 28 \mu\text{g m}^{-3}$). Puede concluirse, por tanto, que en las tres poblaciones este contaminante ha supuesto un riesgo bajo a moderado para la conservación de patrimonio ferroviario en la Comunitat Valenciana.

La concentración de O_3 presenta un perfil para la tendencia histórica lineal creciente en Valencia y Vilafranca del Cid y parabólico cóncavo en Alcoi. Las concentraciones medias superan con creces el valor tolerable para bienes culturales en interiores y lugares resguardados ($2 \mu\text{g m}^{-3}$) siendo Vilafranca del Cid la población que registra el valor más elevado. La máxima amplitud para el periodo se registra en Alcoi ($21 \mu\text{g m}^{-3}$) y está en torno a $9,5 \mu\text{g m}^{-3}$ en las otras dos poblaciones. Puede concluirse, por tanto, que en las tres poblaciones este contaminante supone un riesgo para la conservación de patrimonio ferroviario en la Comunitat Valenciana.

La concentración de $\text{PM}_{2,5}$ exhibe una tendencia parabólico convexa en Alcoi y Valencia. Las concentraciones medias son $15,3$ y $12 \mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente. Alcoi es la población que registra el valor más elevado de $19 \mu\text{g m}^{-3}$. La máxima amplitud para el periodo es similar en ambas poblaciones ($\sim 7 \mu\text{g m}^{-3}$). Puede concluirse, por tanto, que es necesario llevar un control riguroso de los niveles de concentración que adquiere este contaminante en las tres para minimizar los riesgos de daños para el patrimonio ferroviario en la Comunitat Valenciana.

La concentración de PM_{10} exhibe una tendencia parabólico convexa en Alcoi y Valencia. Las concentraciones medias son $15,2$ y $18,4 \mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente. Valencia es la población que registra el valor más elevado de $27 \mu\text{g m}^{-3}$, mientras que la máxima amplitud para el periodo se reporta en Alcoi con $11,3 \mu\text{g m}^{-3}$. Puede concluirse, por tanto, que es necesario llevar un control riguroso de los niveles de concentración que adquiere este contaminante en las tres para minimizar los riesgos de daños para el patrimonio ferroviario en la Comunitat Valenciana.

Tabla 9.40. Valores medios y tipo de tendencia de las variables de calidad del aire para las diferentes localidades en el periodo 2007-2022. C_{SO_2} : concentración de SO_2 ($\mu g\ m^{-3}$); C_{NO_2} : concentración de NO_2 ($\mu g\ m^{-3}$); C_{O_3} : concentración de O_3 ($\mu g\ m^{-3}$); $C_{PM_{2,5}}$: concentración de $PM_{2,5}$ ($\mu g\ m^{-3}$); $C_{PM_{10}}$: concentración de PM_{10} ($\mu g\ m^{-3}$).

Población	Variable registrada				Tendencia 2007-2022
	$C_{SO_2\text{media}}$	$C_{SO_2\text{máxima}}$	$C_{SO_2\text{mínima}}$	$C_{SO_2\ 2022}$	
Alcoi-Pinoso	3,1	5	1,6	3,1	Parabólica convexa
Valencia	3,5	5	1,5	3	Parabólica convexa
Vilafranca del Cid	4,1	8	2,5	3,7	Parabólica convexa
	$C_{NO_2\text{media}}$	$C_{NO_2\text{máxima}}$	$C_{NO_2\text{mínima}}$	$C_{NO_2\ 2022}$	
Alcoi-Pinoso	13	22	7,5	7,5	Exponencial decreciente
Valencia	21,8	37	9	12	Exponencial decreciente
Vilafranca del Cid	6	13	3,9	5	Parabólica convexa
	$C_{O_3\text{media}}$	$C_{O_3\text{máxima}}$	$C_{O_3\text{mínima}}$	$C_{O_3\ 2022}$	
Alcoi-Pinoso	66	73	52	52	Parabólica cóncava
Valencia	55	59	50	57,5	Lineal creciente
Vilafranca del Cid	75	80	70	79	Lineal creciente
	$C_{PM_{2,5}\ \text{media}}$	$C_{PM_{2,5}\ \text{máxima}}$	$C_{PM_{2,5}\ \text{mínima}}$	$C_{PM_{2,5}\ 2022}$	
Alcoi-Pinoso	15,3	19	12,5	13*	Parabólica convexa
Valencia	12	16	9	11	Parabólica convexa
Vilafranca del Cid	-	-	-	-	-
	$C_{PM_{10}\ \text{media}}$	$C_{PM_{10}\ \text{máxima}}$	$C_{PM_{10}\ \text{mínima}}$	$C_{PM_{10}\ 2022}$	
Alcoi-Pinoso	15,2	23,8	12,5	13	Parabólica convexa
Valencia	18,4	27	22	15	Parabólica convexa
Vilafranca del Cid	-	-	-	-	-

* Datos disponibles de 2007 hasta 2013

9.6. Referencias

AEMET (n.d.) Base de datos. Inventarios históricos meteorológicos on-line. Disponible en: <http://www.aemet.es>. [Consultado 06-08-2023].

JSON To CSV Converter. Disponible en: <http://www.convertcsv.com>. [Consultado 06-08-2022].

Michalski, S. (1994) Relative Humidity and Temperature Guidelines: What's Happening? Disponible en: <https://es.scribd.com/document/396814229/Relative-Humidity-and-Temperature-Guidelines-What-s-Happening-By-Stefan-Michalski#>. [Consultado 9-05-2023].

Ministerio de Cultura (2009) *Normas de conservación preventiva para la implantación de sistemas de control de condiciones ambientales en museos, bibliotecas, archivos, monumentos y edificios históricos*. Disponible en: <https://www.culturaydeporte.gob.es/planes-nacionales/dam/jcr:a8616b46-27cb-45fd-b121-79899d8d6907/ipce-normas-climatizacion.pdf>. [Consultado 9-05-2023].

RVVCCA-GVA. (n.d.) Base de datos. Inventarios históricos de calidad de aire on-line. Disponible en: <http://www.agroambient.gva.es>. [Consultado 06-08-2023].

UNE-EN ISO 9223:2012 Corrosión de metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Clasificación, determinación y estimación. UNE Asociación Española de Normalización. Disponible en: <http://une.org>. [Consultado 6-05-2023].

Upham, L.N. (1992) "The Standards Connection", *Journal of Education for Library and Information Science*, 33(1), 72-74.

9.7. Bibliografía

VV.AA. (2014). *Manual de Seguimiento y Análisis de Condiciones Ambientales*. Madrid: MECD. Disponible en: <https://sede.educacion.gob.es/publiventa/descarga.action>. [Consultado 31-08-2022].

Vicente Serrano, S.M., y Rodríguez Camino, E. (2017) "Tendencias recientes de las variables atmosféricas en España", *Clivar Exchanges*, 73, pp.12-23 y referencias citadas.

Capítulo 10:

Modelización de la corrosividad con el cambio climático

Contenidos

- 10.1. Modelo de corrosión atmosférica
 - 10.1.1. Elección del modelo general de corrosión
 - 10.1.2. Elección de la localización. Caso de estudio
 - 10.1.3. El problema del cambio climático
- 10.2. Determinación del factor de cambio de la velocidad de corrosión del acero con el cambio climático
 - 10.2.1. Efecto de la contaminación atmosférica
 - 10.2.2. Efecto de la temperatura
 - 10.2.3. Tiempo de humectación
 - 10.2.4. Salinidad aerotransportada atmosférica
 - 10.2.5. Dependencia de la salinidad con la distancia a la costa
- 10.3. Proyecciones climáticas
 - 10.3.1. Modelo de proyección regionalizada
 - 10.3.2. Dominio espacial
 - 10.3.3. Formato de datos
- 10.4. Escenarios de emisión
- 10.5. Proyección de la corrosión del acero en Valencia.
 - 10.5.1. Contribución de la temperatura
 - 10.5.2. Contribución del tiempo de humectación
 - 10.5.3. Contribución de la salinidad atmosférica
- 10.6. Mapas de corrosividad de la Comunitat Valenciana
 - 10.6.1. Modelo de dependencia con la distancia a la costa
 - 10.6.2. Criterios de elaboración de mapas proyectados
- 10.7. Incertidumbre
- 10.8. Conclusiones
- 10.9. Referencias
- 10.10. Bibliografía

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en el proyecto AICO2021/095 relativos al desarrollo de un modelo adaptado a la especificidad de la Comunitat Valenciana para evaluar los efectos del cambio climático en la corrosión atmosférica de metales (acero). La estrategia metodológica seguida ha consistido en adaptar modelos con validez probada a las especificidades de la Comunitat Valenciana.

10.1. Modelo de corrosión atmosférica

La presente investigación ha implicado el desarrollo de un modelo teórico aplicable, en el futuro, como método de trabajo en cualquier sistema de gestión integral del patrimonio ferroviario valenciano.

10.1.1. Elección del modelo general de corrosión

Los estudios realizados hasta el momento acerca de la influencia del cambio climático en los procesos de corrosión de metales y, específicamente, en aceros y aleaciones de hierro, han seguido una metodología consistente en calcular valores futuros de espesor de la capa de corrosión a partir de los modelos existentes de la función dosis-respuesta como la descrita por la ecuación 7.11 (Vidal *et al.*, 2019; Ngene *at al.*, 2015). El inconveniente de este método es que requiere conocer los valores proyectados de deposición de SO₂ y cloruros. Desafortunadamente, estos valores no están incluidos en las bases de datos de proyecciones regionalizadas para el siglo XXI referidas a la península ibérica que facilita la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Como estrategia alternativa, en este proyecto se ha optado por desarrollar un modelo teórico de la cinética de corrosión asociada al cambio climático a partir del modelo general reportado en la bibliografía y contrastado con datos experimentales. Este modelo es una combinación de modelos más específicos que describen la influencia o efecto sobre el proceso de corrosión de metales de los principales agentes medioambientales determinantes del cambio climático.

Se parte del modelo potencial de cinética de corrosión metálica, ya detallado en el capítulo 7, que describe la corrosión mediante una función potencial de la variable representativa del proceso de corrosión (espesor de la capa de corrosión, pérdida de masa del metal) frente al tiempo,

$$C_{\text{atm}} = C_0 t^n \quad (10.1)$$

Donde c_{atm} es el valor de la variable representativa del proceso de corrosión, por ejemplo, espesor de la capa de corrosión, tras un periodo de exposición t y c_0 es el valor inicial, también denominado **velocidad de corrosión**.

En una situación ideal, en la que no existiese cambio climático, el valor de c_0 sería constante para una localización geográfica dada puesto que la velocidad de corrosión, como ya se describió en el capítulo 7, depende de las condiciones del medioambiente del lugar. Con el cambio climático, sin embargo, la velocidad de corrosión c_0 , además de variar de una localización a otra con diferentes características medioambientales, va a experimentar un cambio en el tiempo, ya que las condiciones medioambientales van

a ir modificándose en el futuro como resultado de la aparición de este fenómeno. Por consiguiente, para conocer el efecto del cambio climático sobre la corrosión metálica será necesario estudiar cómo varía la velocidad de corrosión c_0 en el futuro.

10.1.2. Elección de la localización. Caso de estudio

El lugar o punto de referencia elegido para aplicar esta metodología de trabajo es el campus de Vera de la Universitat Politècnica de València ya que en esta localización se dispone de valores experimentales de las principales variables medioambientales implicadas de manera que puede comprobarse su validez. Además, en el campus de Vera también se encuentra exhibida la locomotora Mikado 141F-2295 que ha sido elegida para elaborar un programa de conservación preventiva-piloto que ha constituido uno de los objetivos fundamentales del proyecto AICO20121/095 (figuras 10.1 y 10.2). Este bien ferrocarrilero ha sido seleccionado por una serie de motivos que seguidamente se detallan y que hacen de él un caso de estudio muy interesante y singular:

- Bien ferrocarrilero no incluido en listados oficiales de bienes patrimoniales.
- Localización en un ambiente urbano-marítimo (distancia al mar, 2,5 km), uno de los ambientes más perjudiciales para la conservación de metales.
- Ubicación próxima a una estación meteorológica y de control de la calidad del aire de la Red valenciana de vigilancia y control de la contaminación atmosférica.
- La locomotora se exhibe al aire libre.

Estas características han hecho que pueda ser posible una mayor y mejor adquisición de datos sobre un bien cuyas condiciones de exhibición, ubicación en exterior y localización próxima al mar, lo hacen particularmente vulnerable.



Figura 10.1. Imagen de la locomotora Mikado 141F-2295 exhibida en el campus de Vera de la Universitat Politècnica de València.



Figura 10.2. Imagen de la locomotora Mikado 141F-2295 exhibida en el campus de Vera de la Universitat Politècnica de València.

Una vez que el modelo se haya verificado a partir de los datos experimentales, se extenderá al resto de la Comunitat Valenciana con objeto de obtener un mapa de corrosividad que dé a conocer el nivel de vulnerabilidad del patrimonio ferroviario a la corrosión metálica en función de su ubicación.

10.1.3. El problema del cambio climático

En ausencia del cambio climático, la ecuación (10.1) puede ser utilizada de forma indefinida, una vez calculados los valores del exponente n y de c_0 , que son característicos del tipo de metal y de las condiciones medioambientales locales, respectivamente. La figura 10.3 muestra cómo, en ausencia de cambio climático, esta ecuación no cambia a lo largo del siglo XXI pues los parámetros c_0 y n son constantes.

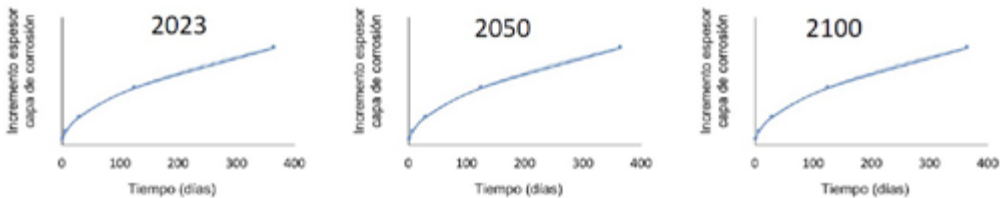


Figura 10.3. Gráfica corrosión versus tiempo en tres diferentes momentos del siglo XXI en ausencia de cambio climático.

La aparición del cambio climático ha traído como consecuencia la progresiva transformación de las condiciones medioambientales, de manera que la velocidad de corrosión c_o deja de ser constante y va incrementando su valor a medida que las condiciones medioambientales van modificándose, tal como muestra la figura 10.4.

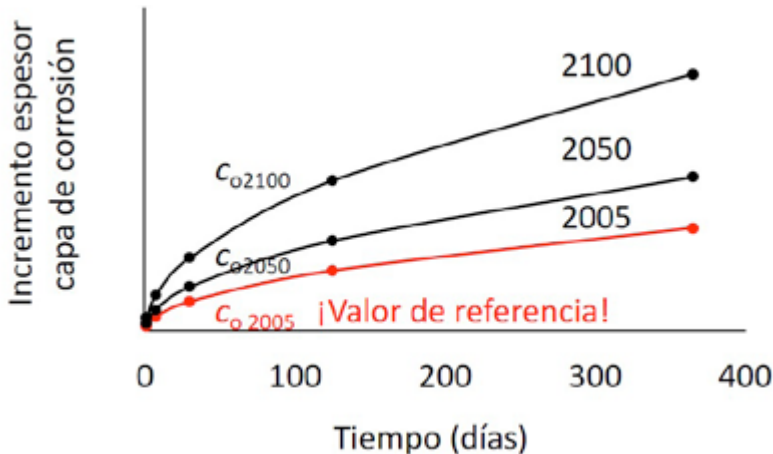


Figura 10.4. Modificación de la gráfica corrosión versus tiempo en tres diferentes momentos del siglo XXI con el cambio climático.

Por consiguiente, para poder realizar una estimación de cómo se modificarán los procesos de corrosión en el futuro es necesario conocer cómo irá cambiando c_o con el tiempo, esto es, hay que determinar los nuevos valores $c_{o\text{ proyectado}}$ que adquirirá la velocidad de corrosión en instantes futuros de tiempo, $t_{\text{ proyectado}}$. Nótese que, como muestra la figura 10.4, el método propuesto requiere que se adopte un valor de referencia c_o en la escala de tiempo. Este valor de la velocidad de corrosión va a utilizarse para medir el cambio que la velocidad de corrosión experimenta con el tiempo. El valor $c_{o\text{ referencia}}$ puede corresponder al momento presente o a algún momento en el pasado del que se disponga de datos experimentales. Los valores del factor de cambio de la velocidad de corrosión serán diferentes, por tanto, dependiendo del momento en el que se comience a medir el tiempo y esto dependerá del objetivo perseguido en la investigación y de los datos históricos disponibles en el pasado y presente.

La elaboración del modelo teórico está basada en la combinación de datos procedentes de tres tipos de fuentes:

- Leyes y principios generales y modelos teóricos ampliamente aceptados en ciencia de la corrosión.
- Proyecciones climáticas elaboradas a partir de procesos de regionalización.
- Escenarios establecidos por el Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, 2023a, 2023b).

La estrategia operativa para el diseño del modelo teórico se desarrolla en tres etapas sucesivas en las que se van incorporando los datos procedentes de cada una de las anteriores fuentes, tal como muestra la figura 10.5:

- *Etapa 1:* Elección del modelo teórico general para la corrosión y de los modelos físico-químicos específicos que relacionan la velocidad de corrosión con los agentes medioambientales (temperatura, humedad, contaminantes...) que van a verse modificados con el cambio climático.
- *Etapa 2:* Elección del modelo de regionalización y desarrollo de procedimientos de obtención de datos meteorológicos proyectados.
- *Etapa 3:* Implementación en el modelo físico-químico de corrosión de los datos proyectados en los dos escenarios extremos (RCP4.5 y RCP8.5) propuestos por el IPCC en el quinto informe de evaluación (AR5, por sus siglas en inglés).

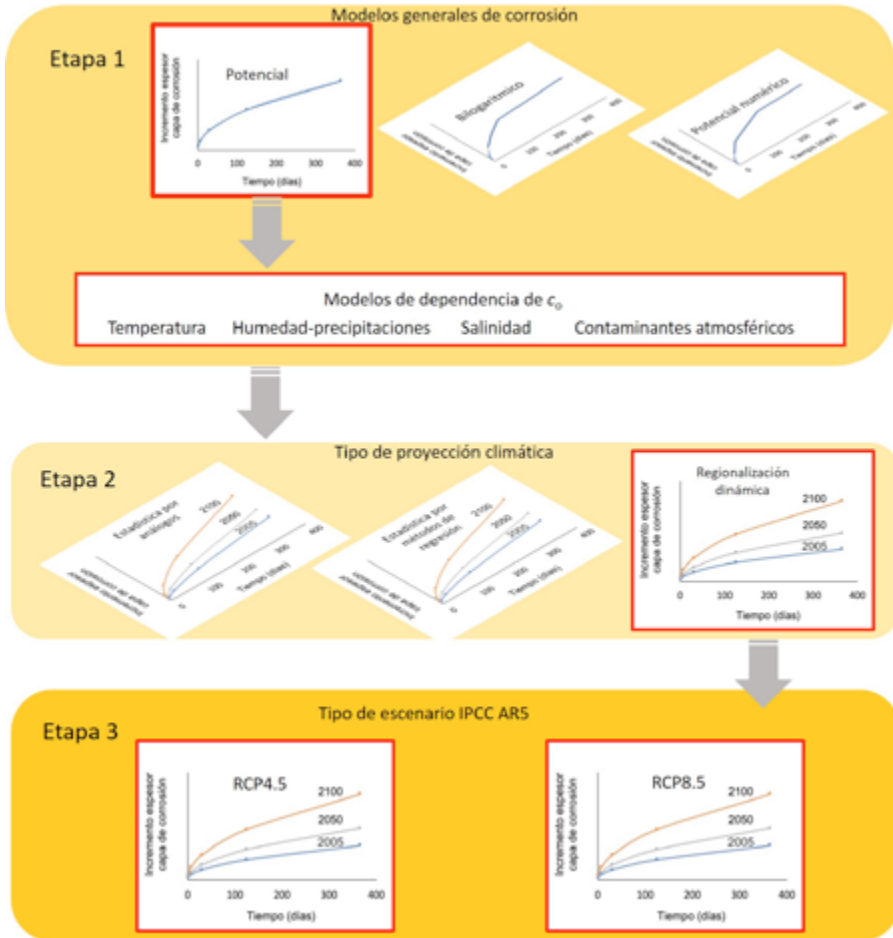


Figura 10.5. Estrategia general seguida en el proyecto AICO2021/095 para la evaluación de la corrosión con el cambio climático en el caso de estudio de la Comunitat Valenciana. Cálculo de los valores de la velocidad de corrosión proyectados con modelos de regionalización dinámica en diferentes escenarios elaborados en el AR5 por el IPCC.

Como se ha mencionado previamente, el método desarrollado en el proyecto AICO2021/095 va a ser aplicado, en primer lugar, al caso de estudio seleccionado, la locomotora Mikado 141F-2295, ubicada en la ciudad de Valencia. Una vez confirmada su

validez con datos experimentales, el modelo se extenderá a diferentes localizaciones de la Comunitat Valenciana. Lo primero aportará datos de utilidad para la elaboración de un programa de conservación preventiva de la locomotora. Lo segundo, va a permitir obtener mapas de corrosividad en diferentes escenarios y en diferentes momentos futuros. No obstante, como el método de trabajo desarrollado se basa en una metodología de carácter general, es aplicable para el estudio de cualquier objeto patrimonial de acero ubicado en cualquier punto de la geografía valenciana.

10.2. Determinación del factor de cambio de la velocidad de corrosión del acero con el cambio climático

La aplicación de la ecuación potencial general (10.1) para procesos de corrosión de metales requiere conocer el valor de c_o . Este parámetro denominado **velocidad de corrosión**, en realidad, describe las características de la corrosión durante el primer año y es específico de cada localización geográfica y de sus características climáticas y medioambientales. Por consiguiente, el primer paso para estudiar los efectos del cambio climático en los procesos de corrosión va a consistir en establecer funciones específicas de dependencia de c_o con variables o indicadores cuantitativos de los diferentes agentes climático-meteorológicos y de calidad de aire con influencia en los procesos de corrosión. La figura 10.6 es un esquema jerárquico que ilustra el planteamiento matemático seguido. En primer lugar, se asume que c_o puede descomponerse en una serie de componentes c_{oT} , c_{ow} , c_{oS} y c_{oP} que representan las contribuciones de cada agente medioambiental adverso, a saber, temperatura, humedad-precipitaciones, aerosoles marinos y contaminantes atmosféricos. Estas contribuciones están relacionadas entre sí por una cierta función matemática. Cada contribución c_{oi} , a su vez, puede relacionarse matemáticamente con una variable, incluida en bases de datos de proyecciones climáticas, que expresa la influencia de cada uno de los factores medioambientales sobre la velocidad de corrosión. Estas variables son: temperatura media anual (T) para la componente c_{oT} , tasa anual de días con precipitaciones superiores a un cierto umbral (D) para la componente c_{ow} , velocidad media anual del viento (U) para la componente c_{oS} y concentración media anual de SO_2 en aire (p) para la componente c_{oP} .

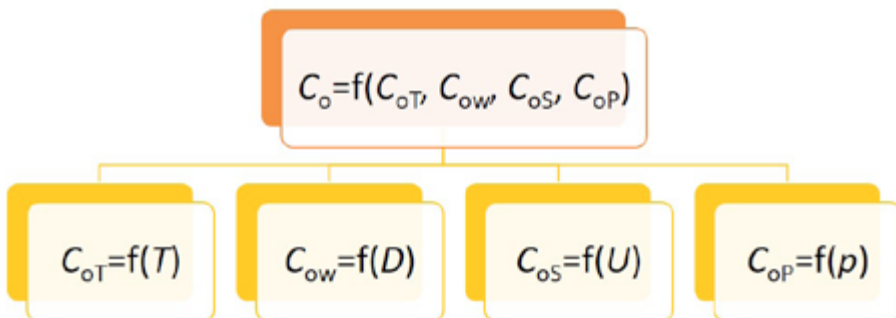


Figura 10.6. Esquema jerárquico ilustrando la relación de la velocidad de corrosión con los diferentes parámetros climático-meteorológicos y de calidad de aire a través de las funciones específicas enunciadas para describir las contribuciones de cada agente medioambiental a la velocidad de corrosión. T , temperatura media anual; D , tasa anual de días con precipitaciones superiores a un cierto umbral; U , velocidad media anual del viento y p , concentración media anual de SO_2 en aire.

Para funcionalizar la dependencia de c_o con respecto a las componentes c_{oT} , c_{ow} , c_{os} y c_{oP} se ha escogido la siguiente expresión, propuesta por Nguyen *et al.* (2011), y contrastada experimentalmente:

$$c_o = c_{oT} c_{ow}^s c_{os}^{s'} + c_{oP} \quad (10.2)$$

Se asume que los valores de los exponentes s y s' dependen exclusivamente del tipo de metal. Para el acero han sido estimados experimentalmente, obteniéndose valores de 0,8 para s y 0,5, para s' (Nguyen *et al.*, 2011), por lo que la ecuación (10.2) puede expresarse más concretamente:

$$c_o = (c_{oT} \cdot c_{ow}^{0,8} \cdot c_{os}^{0,5}) + c_{oP} \quad (10.3)$$

En un futuro proyectado climáticamente a través de los diferentes escenarios de emisión propuestos por el IPCC la velocidad de corrosión ($c_{o \text{ proyectado}}$) habrá variado, probablemente incrementándose, con respecto a un valor de referencia ($c_{o \text{ referencia}}$) correspondiente al momento presente o a un momento de referencia en el pasado. De este modo, se puede definir el **factor de cambio de la velocidad de corrosión** (F_{c_o}) a partir de la relación entre el valor de la velocidad de corrosión en el futuro $c_{o \text{ proyectado}}$ y el valor de referencia $c_{o \text{ referencia}}$. Este coeficiente, que variará con el tiempo, vendría dado por la expresión:

$$F_{c_o} = \frac{c_{o \text{ proyectado}}}{c_{o \text{ referencia}}} = \frac{(c_{oT \text{ proy}} \cdot c_{ow \text{ proy}}^{0,8} \cdot c_{os \text{ proy}}^{0,5}) + c_{oP \text{ proy}}}{(c_{oT \text{ ref}} \cdot c_{ow \text{ ref}}^{0,8} \cdot c_{os \text{ ref}}^{0,5}) + c_{oP \text{ ref}}} \quad (10.4)$$

10.2.1. Efecto de la contaminación atmosférica

Nguyen *et al.* 2011 han demostrado experimentalmente que la influencia de los contaminantes atmosféricos sobre la velocidad de corrosión (c_{op}) puede venir expresada por la ecuación:

$$c_{oP} = b t_w^{0,5} \cdot P \quad (10.5)$$

Donde t_w es el tiempo de humectación (TOW, por sus siglas en inglés), P es la concentración en aire de contaminantes atmosféricos expresada como concentración de SO_2 en $\mu g \cdot m^{-3}$ y b es un coeficiente que depende del tipo de metal. Si se reemplaza el segundo término de la ecuación (10.5) en la ecuación (10.3) se obtiene la siguiente expresión:

$$c_o = c_{oT} \cdot c_{ow}^{0,8} \cdot c_{os}^{0,5} + b t_w^{0,5} \cdot P \quad (10.6)$$

Se ha comprobado que el coeficiente b adopta un valor de 0,1, para el acero. En otros metales como por ejemplo el zinc, mucho más sensibles a los procesos de corrosión, el valor de b se reduce a 0,006. Por este motivo, la contribución asociada a la contaminación atmosférica, se suele eliminar de la ecuación. En otras palabras, el efecto de la contaminación atmosférica es despreciable frente al efecto que la temperatura, la salinidad atmosférica

y la humectación tienen en el proceso de corrosión. De este modo la ecuación (10.6) se simplifica a:

$$c_o = c_{oT} \cdot c_{ow}^{0,8} \cdot c_{os}^{0,5} \tag{10.7}$$

Y por tanto, combinando las ecuaciones (10.4) y (10.7) se obtiene:

$$Fc_o = Fc_{oT} \cdot Fc_{ow}^{0,8} \cdot Fc_{os}^{0,5} \tag{10.8}$$

Siendo Fc_{oT} , Fc_{ow} , Fc_{os} , Fc_{op} las respectivas contribuciones de la temperatura, el tiempo de humectación, la salinidad atmosférica y los contaminantes al factor de cambio de la velocidad de corrosión.

Para poder desarrollar completamente el modelo que permita calcular los factores de cambio de la velocidad de corrosión a partir de las proyecciones climáticas para diferentes escenarios es necesario fijar una referencia en la escala de tiempo. Como se verá y justificará en apartados posteriores, para el presente modelo se ha escogido como año de referencia 2005, de modo que las velocidades de corrosión de referencia $c_{o\text{ referencia}}$ serán las correspondientes a 2005 (c_{o2005}) para cualquier localización geográfica.

10.2.2. Efecto de la temperatura

La relación funcional de dependencia de c_o con la temperatura (T) se basa en el modelo de Cole y Paterson (2010), quienes comprueban que la velocidad de corrosión experimenta un incremento del 0,6 % por cada 2 K de aumento de la temperatura absoluta, lo cual puede expresarse mediante la ecuación siguiente:

$$c_{oT\text{proyectada}} = c_{oT2005} e^{260[(1/T_{2005}) - (1/T_{\text{proyectada}})]} \tag{10.9}$$

Donde c_{oT2005} y $c_{oT\text{proyectada}}$ son las velocidades de corrosión a las temperaturas absolutas T_{2005} en el año 2005, fijado como referencia de tiempo, y $T_{\text{proyectada}}$ correspondiente al año de una determinada proyección climática, por ejemplo 2100. De la ecuación (10.9) se deduce que el factor de cambio de la contribución de la temperatura a la velocidad de corrosión viene dado por la expresión:

$$Fc_{oT} = e^{260[(1/T_{2005}) - (1/T_{\text{proyectada}})]} \tag{10.10}$$

Reemplazando el segundo término de la ecuación (10.10) en la ecuación (10.8) se obtiene:

$$Fc_o = (e^{260[(1/T_{2005}) - (1/T_{\text{proyectada}})]}) \cdot Fc_{ow}^{0,8} \cdot Fc_{os}^{0,5} \tag{10.11}$$

10.2.3. Tiempo de humectación

La influencia de la humedad y las precipitaciones en los procesos de corrosión de metales tiene que ver, principalmente, con la presencia de una lámina de agua sobre la superficie metálica. La existencia de la lámina de agua es indispensable para que la corrosión electroquímica tenga lugar. A partir de este supuesto se ha definido el TOW que, habitualmente, viene expresado en tasa anual de tiempo (t_{TOW}) expresado en horas o días con precipitaciones por encima de un cierto valor umbral o, alternativamente, tasa anual de horas o días con humedad relativa por encima del 80 %. Benarie y Lipfert (1986) y Nguyen *et al.* (2011) han demostrado que el TOW tiene una relación directa con la velocidad de corrosión (capítulo 7).

$$c_{ow} \propto t_{TOW} \quad (10.12)$$

Donde, c_{ow} es la contribución del TOW a la velocidad de corrosión c_o . Si t_{TOW} viene expresado en número de días al año (D) con precipitaciones superiores a un cierto valor umbral. La relación lineal de c_{ow} con D puede expresarse matemáticamente introduciendo una constante K de proporcionalidad. Dicha constante depende de la localización geográfica, esto es, de las condiciones meteorológico-climáticas particulares del lugar,

$$c_{ow} = K \cdot D \quad (10.13)$$

Si se asume que el coeficiente c_{ow} se incrementa linealmente con el tiempo y que la constante K no se modifica sensiblemente, tal como proponen Nguyen *et al.* (2013), la contribución de la humedad-precipitaciones al factor de cambio de la velocidad de corrosión (c_{ow}) puede expresarse:

$$F_{c_{ow}} = \frac{K \cdot D_{\text{proyectado}}}{K \cdot D_{2005}} = \frac{D_{\text{proyectado}}}{D_{2005}} = \quad (10.14)$$

Reemplazando el segundo término de la ecuación (10.14) en la ecuación (10.11) se obtiene:

$$F_{c_o} = (e^{260[(1/T_{2005}) - (1/T_{\text{proyectada}})]) \cdot \left(\frac{D_{\text{proyectado}}}{D_{2005}}\right)^{0,8} \cdot (F_{c_{os}})^{0,5} \quad (10.15)$$

10.2.4. Salinidad aerotransportada atmosférica

El efecto salino en el proceso de corrosión parte de la asunción de que, en buena medida, este se produce por los aerosoles marinos. La producción de aerosol marino en la costa más o menos abrupta depende de los vientos locales. Como se describió en el capítulo 7, la contribución de la salinidad (c_{os}) a la velocidad de corrosión puede relacionarse con

variables cuantificables experimentalmente mediante la expresión propuesta por Cole y Corrigan (2009):

$$c_{oS} = \eta \cdot S \cdot U \cdot A \tag{10.16}$$

Donde η es el denominado **factor de eficiencia de la deposición** de aerosol, S es la salinidad aerotransportada, determinada experimentalmente mediante el método de la candela húmeda (UNE-EN ISO 9225:2012), U es la velocidad del viento media anual medida a nivel de la superficie terrestre (2-10 m) y A es el área de la superficie de la candela en la que impacta el aerosol. Nguyen *et al.* (2013) han utilizado la ecuación de McKay *et al.* (1994) que relaciona la salinidad volumétrica aerotransportada S con la velocidad del viento U de modo que, a partir de la ecuación (10.16), se obtiene:

$$c_{oS} = \eta \cdot U^{\exp(0,23 \cdot U + 3,05)} \cdot U \cdot A \tag{10.17}$$

Por consiguiente, el valor de la contribución del efecto de la salinidad al factor de cambio de la velocidad de corrosión (c_{oS}) vendría dado por la expresión:

$$c_{oS} = \frac{c_{oS \text{ proyectada}}}{c_{oS \text{ 2005}}} = \frac{U_{\text{proyectada}}^{\exp(0,23 \cdot U_{\text{proyectada}} + 3,05)} \cdot U_{\text{proyectada}}}{U_0^{\exp(0,23 \cdot U_0 + 3,05)} \cdot U_0} \tag{10.18}$$

Del mismo modo a como se hizo con el tiempo de humectación, se ha asumido que el coeficiente c_{oS} se incrementa linealmente con el tiempo (Nguyen *et al.*, 2013).

Finalmente, reemplazando el segundo miembro de la ecuación (10.18) en la ecuación (10.15) se obtiene:

$$Fc_o = (e^{260[(1/T_{2005}) - (1/T_{\text{proyectada}})])} \cdot \left(\frac{D_{\text{proyectado}}}{D_{2005}}\right)^{0,8} \cdot \left(\frac{U_{\text{proyectada}}^{\exp(0,23 \cdot U_{\text{proyectada}} + 3,05)} \cdot U_{\text{proyectada}}}{U_0^{\exp(0,23 \cdot U_0 + 3,05)} \cdot U_0}\right)^{0,5} \tag{10.19}$$

Nótese que la ecuación (10.19) finalmente formulada, proporciona el valor del factor de cambio de la velocidad de corrosión en función de variables físicas medibles experimentalmente o que pueden ser obtenidas como datos estimados a partir de proyecciones climáticas en diferentes escenarios.

10.2.5. Modelo de dependencia de la salinidad con la distancia a la costa

Los aerosoles marinos son transportados desde la costa al interior del continente a través del viento. Sin embargo, estudios realizados en diferentes regiones del planeta han demostrado que el efecto sobre la corrosión se reduce cuando se penetra hacia el interior. Esto es debido al efecto de sedimentación por depósito seco o húmedo que tiene lugar al cabo de algún tiempo, en el que el aerosol marino recorre una cierta distancia (Rivero *et al.*, 2007). Esto significa que el modelo de dependencia de la velocidad de corrosión con la salinidad dado por las ecuaciones (10.17) y (10.19) solo sería válido para localizaciones situadas en la línea de costa como, por ejemplo, Valencia.

Consecuentemente, la dependencia de la salinidad aerotransportada con la distancia a la línea de costa debe ser tenida en cuenta para la elaboración de los mapas de corrosividad de la Comunitat Valenciana. Seguidamente se describe el procedimiento propuesto en la presente investigación para determinar el valor del factor de cambio de la contribución de la salinidad a la velocidad de corrosión en aquellas poblaciones que no están en la línea de la costa.

Cole *et al.* (2004) han discriminado dos modelos de producción de aerosoles, los formados en la rompiente de las olas en la costa y los formados mar adentro. A partir de este hecho demostrado estos autores han descrito el comportamiento de estos aerosoles en su avance tierra adentro. Estos comportamientos venían expresados mediante ecuaciones matemáticas que fueron presentadas en el capítulo 7 y que seguidamente se reproducen:

- *Aerosoles formados en el océano para localizaciones tierra adentro a distancias de rango medio (RM) (aprox. 50 km):*

$$S_{\text{océano RM}} = S_0 \exp(-x/50) \quad (10.20)$$

Siendo $S_{\text{océano RM}}$ la salinidad, producida por el océano, en un lugar tierra adentro a una distancia de rango medio x de la costa, S_0 la salinidad en la línea de costa y a una constante asociada al decaimiento de la concentración de aerosol en aire con la distancia.

- *Aerosoles formados en el océano para localizaciones tierra adentro a distancias de rango alto (RA) (aprox. 500 km):*

$$S_{\text{océano RA}} = S_0 [1 - (5 \cdot 10^{-4} \cdot x)] \quad (10.21)$$

Siendo $S_{\text{océano RA}}$ la salinidad, producida en el océano, en un lugar a una distancia de rango alto x tierra adentro y S_0 la salinidad en la línea de costa.

- *Aerosoles formados en la rompiente para localizaciones tierra adentro:*

$$S_{\text{rompiente}} = S_0 [0,9 \exp(-x/0,1) + (0,1e^{-x})] \quad (10.22)$$

Donde $S_{\text{rompiente}}$ es la salinidad producida en la rompiente, calculada para una localización situada a una distancia x tierra adentro y S_0 la salinidad en la línea de costa.

En el capítulo 7 también se mostró que el contenido en el aire de los aerosoles formados en la rompiente se reduce notablemente hasta un 0,5 % del valor inicial a los 700 m de distancia desde la línea de la costa, por lo que esta contribución puede despreciarse excepto para localizaciones que estén situados en la misma línea de costa o a menos de 1 km.

Sin embargo, la contribución de los aerosoles formados en el océano sí que debe ser tomada en consideración ya que, en estos casos, el factor de decaimiento con la distancia no es despreciable. Para resolver este inconveniente se ha propuesto un procedimiento basado en una ecuación desarrollada siguiendo el modelo de Cole *et al.* (2004) para aerosoles formados en el océano:

$$c_{oS} \propto S_{rompiente} \times S_{oc\acute{e}ano\ RA} \times S_{oc\acute{e}ano\ RM} \quad (10.23)$$

$$= S_0 [0,9 \exp(-x/0,1) + (0,1 e^{-x})] \times S_0 [1 - (5 \cdot 10^{-4} \cdot x)] \times S_0 \exp(-x/50)$$

Si se desestima, por las razones ya señaladas, la contribución de aerosoles formados en la rompiente, la ecuación (10.23) se simplifica:

$$c_{oS} = S_{oc\acute{e}ano\ RA} \times S_{oc\acute{e}ano\ RM} = S_0 [1 - (5 \cdot 10^{-4} \cdot x)] \times S_0 \exp(-x/50) \quad (10.24)$$

Como puede comprobarse, la ecuación (10.24) proporciona el valor de la contribución de la salinidad en una localización tierra adentro en función de la salinidad S_0 en la línea de la costa y de la distancia x a la costa. Si se combinan las ecuaciones (10.18) y (10.24) se obtiene:

$$F_{c_{oS}} = \frac{c_{oS\ proyectada}}{c_{oS\ 2005}} = \frac{(U_{proyectada}^{\exp(0,23 \cdot U_{proyectada} + 3,05)} \cdot U_{proyectada}) \cdot [1 - (5 \cdot 10^{-4} \cdot x)] \cdot (U_0^{\exp(0,23 \cdot U_0 + 3,05)} \cdot U_0) \cdot [1 - (5 \cdot 10^{-4} \cdot x)] \cdot ((U_{proyectada}^{\exp(0,23 \cdot U_{proyectada} + 3,05)} \cdot U_{proyectada}) \exp(-x/50))}{(U_0^{\exp(0,23 \cdot U_0 + 3,05)} \cdot U_0) \exp(-x/50)} \quad (10.25)$$

La ecuación (10.25) proporciona el factor de cambio $F_{c_{oS}}$ para cualquier localización tierra adentro en función de la distancia a la costa y de la salinidad en la línea de la costa.

La segunda cuestión a resolver, en el caso de localizaciones situadas tierra adentro, tiene que ver con el hecho de que, en el modelo teórico propuesto en esta investigación, la contribución de la salinidad al factor de cambio de la velocidad de corrosión se ha correlacionado con la velocidad del viento en superficie ya que, a diferencia de la salinidad aerotransportada, es una variable incluida dentro de los listados de variables climáticas de los modelos climáticos regionalizados (capítulo 3). Por otra parte, la correlación realizada en la sección 10.2.4 entre la salinidad aerotransportada y la velocidad del viento, sin considerar la direccionalidad de este, tiene validez en localizaciones costeras donde lo habitual es que, diariamente, se generen vientos o brisas procedentes directamente del mar o que, procedentes de tierra adentro, hayan recorrido una distancia más o menos larga sobre el mar hasta llegar a la población. Por tanto, en primera aproximación es plausible asumir que el promedio mensual o anual del viento producido es íntegramente portador de aerosoles. Sin embargo, esta suposición deja de tener validez para localizaciones situadas tierra adentro. En estos casos la totalidad del viento es terrestre, al menos, en un tramo más o menos largo que culmina en la población-diana. En algunas de estas localizaciones, el mar puede estar a más de 100 km de distancia, por lo que el aporte salino de estos vientos sería muy escaso. Por consiguiente, teniendo en cuenta que la variable meteorológica velocidad de viento no hace distinciones por dirección en las proyecciones climáticas, se estaría incurriendo en un sobredimensionado de la salinidad en las poblaciones de tierra adentro. Este error se minimiza a medida que las localizaciones interiores se aproximan a la costa. En este sentido, puede considerarse que la Comunitat Valenciana es una región muy singular geográficamente ya que ocupa una franja siguiendo la costa, de tal modo que las localidades más alejadas no distan más de 150 km de la línea de la costa. A estas

distancias tierra adentro, puede hacerse la aproximación de que las poblaciones tienen contribución de vientos procedentes del mar en el mismo rango de direcciones que la población más próxima en la línea de costa, como muestra la figura 10.7a. La diferencia estribaría en que en la población del interior habría que minorar el valor de la velocidad del viento con el correspondiente factor de decaimiento dado por la distancia a la costa en cada dirección. Por este motivo, el modelo propuesto se ha mejorado con un último refinamiento. Para incluir en el modelo, en la medida de lo posible, la influencia que en la contribución de la salinidad de las poblaciones tierra adentro puede tener la variabilidad en la dirección del viento, se ha considerado más adecuado calcular la salinidad de las poblaciones situadas tierra adentro promediando las salinidades de las cinco poblaciones más próximas situadas en la línea de costa minoradas con los correspondientes factores de decaimiento con la distancia (figura 10.7b):

$$C_{oS \text{ interior}} = \sum_{i=1}^5 \{ S_{oi} [1 - (5 \cdot 10^{-4} \cdot x)] \times S_{oi} \exp(-x/50) \} \quad (10.26)$$

Y el factor de cambio de la salinidad vendría expresado:

$$F_{C_{oS \text{ interior}}} = \frac{\sum_{i=1}^5 \{ S_{oi \text{ proyectado}} [1 - (5 \cdot 10^{-4} \cdot x)] \times S_{oi \text{ proyectado}} \exp(-x/50) \}}{\sum_{i=1}^5 \{ S_{oi \text{ 2005}} [1 - (5 \cdot 10^{-4} \cdot x)] \times S_{oi \text{ 2005}} \exp(-x/50) \}} \quad (10.27)$$

Sustituyendo la ecuación (10.27) en la ecuación (10.15) se obtiene:

$$F_{C_{oS \text{ interior}}} = \left(e^{260 \left[\frac{1}{T_{2005}} - \frac{1}{T_{\text{proyectada}}} \right]} \right) \cdot \left(\frac{D_{\text{proyectado}}}{D_{2005}} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^5 \{ S_{oi \text{ proyectado}} [1 - (5 \cdot 10^{-4} \cdot x)] \times S_{oi \text{ proyectado}} \exp(-x/50) \}}{\sum_{i=1}^5 \{ S_{oi \text{ 2005}} [1 - (5 \cdot 10^{-4} \cdot x)] \times S_{oi \text{ 2005}} \exp(-x/50) \}} \right)^{0,5} \quad (10.28)$$

Ecuación que proporciona el factor de cambio para poblaciones del interior de la Comunitat Valenciana. De este modo, mediante la ecuación (10.19) se obtendrán las contribuciones de la salinidad $F_{C_{oS}}$ a los factores de cambio de la velocidad de corrosión para localidades en la línea de la costa y mediante la ecuación (10.28) se calcularían los factores $F_{C_{oS}}$ para poblaciones del interior.

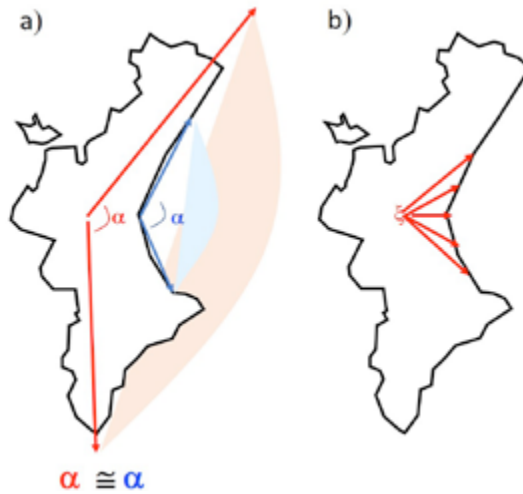


Figura 10.7. Mapa de la Comunitat Valenciana. a) Comparación de vientos marinos en localidades costeras y de interior; b) estimación de salinidad promediando los valores de cinco localizaciones en la línea de costa ponderadas por los correspondientes factores de decaimiento con la distancia.

10.3. Proyecciones climáticas

A partir de las ecuaciones (10.19) y (10.28), es posible obtener los coeficientes o factores de cambio incremental de la velocidad de corrosión referidos al valor de referencia, c_{o2005} , para cualquier escenario de emisiones futuro.

10.3.1. Modelo de proyección regionalizada

Esta investigación ha hecho uso de la nueva colección de proyecciones climáticas obtenidas mediante el método desarrollado en el programa coordinado de regionalización dinámica CORDEX (COordinated Regional Downscaling EXperiment) (CORDEX, 2023) iniciado a propuesta del Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP, por sus siglas en inglés) en el año 2009 (WCRP, 2023). En esta modelización se han utilizado los escenarios elaborados por el IPCC en el AR5. Los datos están disponibles en el portal web de AEMET (AEMET, 2015, 2023). En la regionalización CORDEX se ha llevado a cabo una evaluación de múltiples modelos regionales utilizando el sistema de reanálisis ERA-Interim y asumiendo condiciones de contorno “perfectas”. Como marco de referencia se ha utilizado el periodo de veinte años comprendido entre 1989 y 2007. CORDEX sucede a programas de regionalización dinámica previos entre los que cabe citar PRUDENCE y ENSEMBLES en Europa; NARCCAP en el norte de América; RMIP en el este de Asia y CLARIS en el sur de América. Se ha escogido este tipo de regionalización por ser el único que proporcionaba todos los datos necesarios para calcular F_{c_o} , a saber, velocidad de viento a una altura de 10 m, temperatura media anual y tasa anual de precipitaciones diarias superiores a 20 mm¹.

¹ Los datos que figuran en la base de datos de AEMET corresponden a valores promedio mensuales para las tres variables consultadas. A partir de ellos se han calculado las medias anuales.

La tabla 10.1 muestra los modelos de circulación general que han sido usados en CORDEX (AEMET, 2017).

Tabla 10.1. Modelos Globales y regionales usados en CORDEX Adaptada de AEMET (2017).

Modelo Regional	Modelos de Circulación General			
	CNRM-CM5	EC-EARTH	IPSL-CM5A-MR	MPI-ESM-LR
CCLM4-8-17	x	x	x	x
RCA4	x			x
RACMO22E				x
REMO2009				x

10.3.2. Dominio espacial

AEMET proporciona acceso a datos correspondientes al dominio europeo EURO-CORDEX, que dispone de dos resoluciones, la resolución estándar (EUR44: 0.44°, ~50 km) del CORDEX y una segunda resolución (EUR-11: 0.11°, ~12.5 km). Los datos mensuales corresponden a una rejilla regular, latitud/longitud, con una resolución de 0,125°, que abarca la península ibérica y las islas Baleares. La rejilla ha sido obtenida por interpolación bilineal a partir de la rejilla rotada original de EUR-11 (AEMET, 2017).

10.3.3. Formato de datos

Los datos proporcionados son acumulados mensuales que se facilitan en formato GIS como archivos ASCII grid ARCGIS. La figura 10.8 muestra una imagen parcial de los datos tal como se importan a la hoja Excel desde la base de datos de AEMET.

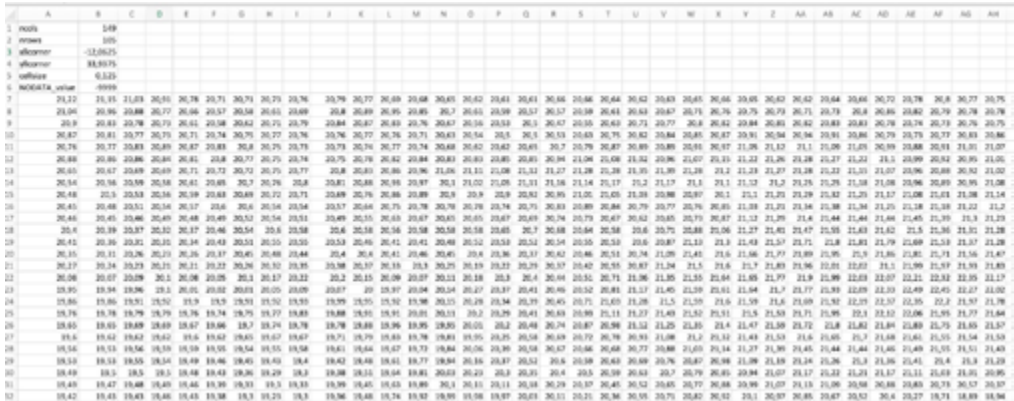


Figura 10.8. Imagen de hoja Excel con un archivo CORDEX importado.

10.4. Escenarios de emisión

El programa CORDEX utiliza los escenarios de emisión propuestos por el IPCC en el AR5. En esta evaluación se establecieron cuatro escenarios denominados **Trayectorias de**

Concentración Representativas (RCP, de sus siglas en inglés) (capítulo 2). Actualmente, solo están disponibles en AEMET datos correspondientes a los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, por consiguiente, se han realizado cálculos únicamente con estos dos escenarios.

10.5. Proyección de la corrosión del acero en Valencia

Para ilustrar el método desarrollado en esta investigación, la ecuación (10.19) se ha aplicado a la ubicación de la locomotora Mikado 141F-2295. La tabla 10.2 resume los datos básicos utilizados en este caso práctico.

Tabla 10.2. Condiciones y valores de parámetros utilizados en el cálculo de la velocidad de corrosión del acero en la locomotora Mikado 141F-2295.

Parámetro	Descripción
Localización geográfica	Valencia Latitud: -0,36639 Longitud: 39,4806 Distancia al mar: 2,5 km
Horizonte temporal	Cálculo de valores específicos para los años 2050 y 2100
Año de referencia	2005 último año con datos históricos suministrado por AEMET en CORDEX
Fuente	AEMET
Modelo de proyección climática	CORDEX Datos en rejilla con resolución 0,11°
Tipo de regionalización	Regionalización dinámica
Escenarios IPCC	Escenarios de emisión elaborados en el AR5 RCP4.5 RCP8.5
Variables utilizadas	Temperatura promedio anual Número de días con precipitación >20 mm Velocidad promedio anual del viento a 10 m

La tabla 10.3 resume, como ejemplo, los resultados obtenidos en el cálculo de la contribución de la temperatura al factor de cambio de la velocidad de corrosión por efecto del cambio climático para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en 2050 y 2100 referidos a 2005 en la ciudad de Valencia.

Tabla 10.3. Valores del factor incremental del efecto de la temperatura en la velocidad de corrosión en 2050 y 2100 calculados para los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5 en la ciudad de Valencia.

	$e^{260[(1/T_0)-(1/T_{\text{proyectada}})]}$	
	RCP4.5	RCP8.5
2050	1,013	1,009
2100	1,012	1,016

La tabla 10.4 resume los resultados obtenidos en el cálculo de la contribución de la humedad-precipitaciones al factor de cambio de la velocidad de corrosión por efecto del cambio climático para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en 2050 y 2100 referidos a 2005.

Tabla 10.4. Valores del factor incremental del efecto de la humedad y precipitaciones en la velocidad de corrosión en 2050 y 2100 calculados para los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5 en la ciudad de Valencia.

	$F_{c_{ow}} = \frac{t_w \text{ proyectado}}{t_w 2005} = \frac{0,22 \cdot D_{\text{proyectado}}}{0,22 \cdot D_{2005}}$	
	RCP4.5	RCP8.5
2050	2,333	0,636
2100	7,000	2,333

La tabla 10.5 resume los resultados obtenidos en el cálculo de la contribución de la salinidad al factor de cambio de la velocidad de corrosión por efecto del cambio climático para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en 2050 y 2100 referidos a 2005.

Tabla 10.5. Valores del factor incremental del efecto de la salinidad en la velocidad de corrosión en 2050 y 2100 calculados para los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5 en la ciudad de Valencia.

	$F_{c_{oS}} = \frac{c_{oS} \text{ proyectada}}{c_{oS} 2005} = \frac{U_{\text{proyectada}}^{\exp(0,23 \cdot U_{\text{proyectada}} + 3,05)} \cdot U_{\text{proyectada}}}{U_0^{\exp(0,23 \cdot U_0 + 3,05)} \cdot U_0}$	
	RCP4.5	RCP8.5
2050	1,673	1,157
2100	1,255	0,781

Finalmente, la tabla 10.6 resume los resultados obtenidos en el cálculo del factor de cambio de la velocidad de corrosión por efecto del cambio climático para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en 2050 y 2100 referidos a 2005.

Tabla 10.6. Valores del factor de cambio F_{C_0} de la velocidad de corrosión en 2050 y 2100 calculados para los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5 en la ciudad de Valencia.

	F_{C_0}	
	RCP4.5	RCP8.5
2050	0,665	1,563
2100	0,239	0,456

10.6. Mapas de corrosividad de la Comunitat Valenciana

El modelo usado para la ciudad de Valencia puede ser aplicado para cualquier localización en el ámbito de la Comunitat Valenciana. En este apartado se describe el procedimiento aplicado.

Para construir los mapas de corrosividad de la Comunitat Valenciana, se ha determinado el valor del factor de cambio F_{C_0} en diversas poblaciones representativas de todas las comarcas incluidas en cada una de las zonas climáticas de la Comunitat Valenciana para los años 2050 y 2100 y los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. En la tabla 10.7 se listan las poblaciones seleccionadas, clasificadas por zonas climáticas y comarcas, así como sus coordenadas geográficas y en las tablas 10.8 y 10.9 se dan los valores calculados de F_{C_0} .

Tabla 10.7. Poblaciones de la Comunitat Valenciana seleccionadas y sus principales características.

Región climática	Comarca	Localidad	Coordenadas geográficas
A	Ribera Baixa	Sueca	Longitud: -0,3111400; Latitud: 39,2026000
	Horta de València	Valencia	Longitud: 0,3773900; Latitud: 39,4697500
	Camp de Molvedre	Sagunto	Longitud: -0,2666700; Latitud: 39,6833300
	La Plana Baixa	Burriana	Longitud: -0,0754226; Latitud: 39,8896017
	La Plana Alta	Castellón	Longitud -0,045006; Latitud: 39,985038
	Baix Maestrat	Vinaroz	Longitud: 0,4755900; Latitud: 40,4703300
B	La Safor	Gandía	Longitud: -0,1833300; Latitud: 38,9666700
	La Marina Alta	Denia	Longitud: 0,108575; Latitud: 38,8404

C	Baix Segura	Orihuela	Longitud: -0,9440100; Latitud: 38,0848300
	Baix Vinalopó	Elche	Longitud: -0,698459; Latitud: 38,2655
	Vinalopó medio	Aspe	Longitud: -0,7672100; Latitud: 38,3451100
	Camp d' Alicante	Alicante	Longitud: -0,4814900; Latitud: 38,3451700
	La Marina Baixa	Villajoyosa	Longitud: -0,2334600; Latitud: 38,5075400
D	Canal de Navarrés	Enguera	Longitud: -0,6868300; Latitud: 38,9797400
	Ribera Alta	Alcira	Longitud: -0,4333300; Latitud: 39,1500000
	Camp de Turia	Llíria	Longitud: -0,6000000; Latitud: 39,6333300
	Los Serranos	Chelva	Longitud: -0,9968400; Latitud: 39,7493000
	Alt Palancia	Segorbe	Longitud: -0,4833300; Latitud: 39,8500000
	Alt Millars	Cirat	Longitud: -0,4559614; Latitud: 40,051671
	La Plana Baixa	Onda	Longitud: -0,2271400; Latitud: 39,9914900
	L'Alcalatén	Alcora	Longitud: -0,21302; Latitud: 40,0728
	La Plana Alta	Coves de Vinromá	Longitud: 0,122541; Latitud: 40,308
	Baix Maestrat		Longitud: -0,7194600; Latitud: 41,8577900
		San Mateo	
E	Los Serranos	Ademúz	Longitud: -1,2867700; Latitud: 40,0613900
	Alt Palancia	Barracas	Longitud: -0,6833300; Latitud: 40,0166700
	Alt Millars	Montanejos	Longitud: -0,5286100; Latitud: 40,0704000
	L'Alcalatén	Chodos	Longitud: -0,287507; Latitud: 40,2456
	Alt Maestrat	Ares del Maestre	Longitud: -0,1326700; Latitud: 40,4567500
	Els Ports	Morella	Longitud: -0,0776200; Latitud: 40,5818700

F	El Comptat	Cocentaina	Longitud: -0,4397600; Latitud: 38,7397500
	Vall d'Albaida	Ontinyent	Longitud: -0,6166700; Latitud: 38,8166700
	La Costera	Xàtiva	Longitud: -0,5166700; Latitud: 38,9833300
G	Vall de Vinalopó	Novelda	Longitud: -0,765386; Latitud: 38,3853
	Alt Vinalopó	Villena	Longitud: -0,8656800; Latitud: 38,6373000
	La Foya d'Alcoi	Alcoi	Longitud: -0,4743200; Latitud: 38,7054500
H	La Costera	Font de la Figuera	Longitud: -0,8641700; Latitud: 38,8245100
	La Canal de Navarrés	Navarrés	Longitud: -0,6946900; Latitud: 39,1019800
	Val de Cofrents	Cofrents	Longitud: -1,0606100; Latitud: 39,2292600
	Foya de Bunyol	Bunyol	Longitud: -0,7833300; Latitud: 39,4166700
	Plá d'Utiel	Requena	Longitud: -1,1004400; Latitud: 39,4883400

Tabla 10.8. Valores del factor de cambio de la velocidad de corrosión en el escenario RCP4.5 en los años 2050 y 2100 calculados para cuarenta poblaciones de la Comunitat Valenciana.

Localización			RCP4.5	
Región climática	Comarca	Localidad	2050	2100
A	Ribera Baixa	Sueca	0,849	0,168
	Horta de València	Valencia	0,665	0,239
	Camp de Molvedre	Sagunto	0,754	0,001
	La Plana Baixa	Burriana	0,670	0,143
	La Plana Alta	Castellón	0,606	0,141
	Baix Maestrat	Vinaroz	0,943	0,223

B	La Safor	Gandía	1,945	0,304
	La Marina Alta	Denia	0,993	0,260
C	Baix Segura	Orihuela	0,997	0,444
	Baix Vinalopó	Elche	0,806	1,071
	Vinalopó medio	Aspe	1,419	1,399
	Camp d' Alicante	Alicante	0,002	0,355
	La Marina Baixa	Villajoyosa	0,784	0,291
D	Canal de Navarrés	Enguera	0,139	0,663
	Ribera Alta	Alcira	0,488	0,133
	Camp de Turia	Llíria	0,485	0,737
	Los Serranos	Chelva	0,308	0,475
	Alt Palancia	Segorbe	0,535	0,296
	Alt Millars	Cirat	0,515	0,364
	La Plana Baixa	Onda	0,596	0,003
	L'Alcalatén	Alcora	0,685	0,319
	La Plana Alta	Coves de Vinromá	0,541	0,320
	Baix Maestrat	San Mateo	1,021	1,459
E	Los Serranos	Ademúz	0,360	0,453
	Alt Palancia	Barracas	0,614	0,292
	Alt Millars	Montanejos	0,490	0,133
	L'Alcalatén	Chodos	0,376	0,225
	Alt Maestrat	Ares del Maestre	0,511	0,305
	Els Ports	Morella	0,562	0,604
F	El Comptat	Cocentaina	0,220	0,868
	Vall d'Albaida	Ontinyent	0,727	0,228
	La Costera	Xàtiva	0,464	0,120
G	Vall de Vinalopó	Novelda	0,217	0,871
	Alt Vinalopó	Villena	0,674	0,001
	La Foya d'Alcoi	Alcoi	0,688	0,001

H	La Costera	Font de la Figuera	0,149	0,152
	La Canal de Navarrés	Navarrés	0,500	0,112
	Val de Cofrents	Cofrents	0,764	0,214
	Foya de Bunyol	Bunyol	0,521	0,187
	Plá d'Utiel	Requena	0,122	0,142

Tabla 10.9. Valores del factor de cambio de la velocidad de corrosión en el escenario RCP8.5 en los años 2050 y 2100 calculados para cuarenta poblaciones de la Comunitat Valenciana.

Localización			RCP8.5	
Región climática	Comarca	Localidad	2050	2100
A	Ribera Baixa	Sueca	0,668	0,247
	Horta de València	Valencia	1,563	0,456
	Camp de Molvedre	Sagunto	1,480	0,379
	La Plana Baixa	Burriana	0,579	0,244
	La Plana Alta	Castellón	0,515	0,257
	Baix Maestrat	Vinaroz	1,226	0,352
B	La Safor	Gandía	1,406	0,486
	La Marina Alta	Denia	0,985	0,146
C	Baix Segura	Orihuela	0,707	0,740
	Baix Vinalopó	Elche	1,699	1,414
	Vinalopó medio	Aspe	1,350	1,419
	Camp d' Alicante	Alicante	1,160	0,581
	La Marina Baixa	Villajoyosa	0,159	0,166

D	Canal de Navarrés	Enguera	0,945	1,144
	Ribera Alta	Alcira	0,888	0,283
	Camp de Turia	Llíria	1,200	0,940
	Los Serranos	Chelva	0,762	0,619
	Alt Palancia	Segorbe	0,996	0,381
	Alt Millars	Cirat	0,623	0,350
	La Plana Baixa	Onda	0,910	0,298
	L'Alcalatén	Alcora	0,694	0,265
	La Plana Alta	Coves de Vinromá	0,765	0,011
	Baix Maestrat	San Mateo	0,833	0,698
E	Los Serranos	Ademúz	0,216	0,444
	Alt Palancia	Barracas	0,963	0,508
	Alt Millars	Montanejos	0,764	0,402
	L'Alcalatén	Chodos	0,606	0,426
	Alt Maestrat	Ares del Mestre	0,872	0,354
	Els Ports	Morella	0,807	0,354
F	El Comptat	Cocentaina	0,451	0,747
	Vall d'Albaida	Ontinyent	0,749	0,126
	La Costera	Xàtiva	0,651	0,112
G	Vall de Vinalopó	Novelda	0,457	0,571
	Alt Vinalopó	Villena	0,533	0,286
	La Foya d'Alcoi	Alcoi	0,527	0,286
H	La Costera	Font de la Figuera	0,874	0,145
	La Canal de Navarrés	Navarrés	0,570	0,100
	Val de Cofrents	Cofrents	0,879	0,464
	Foya de Bunyol	Bunyol	0,986	0,481
	Plà d'Utiel	Requena	0,196	0,154

Las figuras 10.9 a 10.12 ilustran de modo gráfico los resultados obtenidos. Con los valores del factor de cambio de la velocidad de corrosión F_c , que aparecen listados en las tablas 10.8 y 10.9 se han elaborado mapas de corrosividad en los que, con la escala de colores, se representan intervalos de F_c . De este modo se visualizan claramente las regiones o comarcas en las que la velocidad de corrosión se modifica en mayor o menor medida.

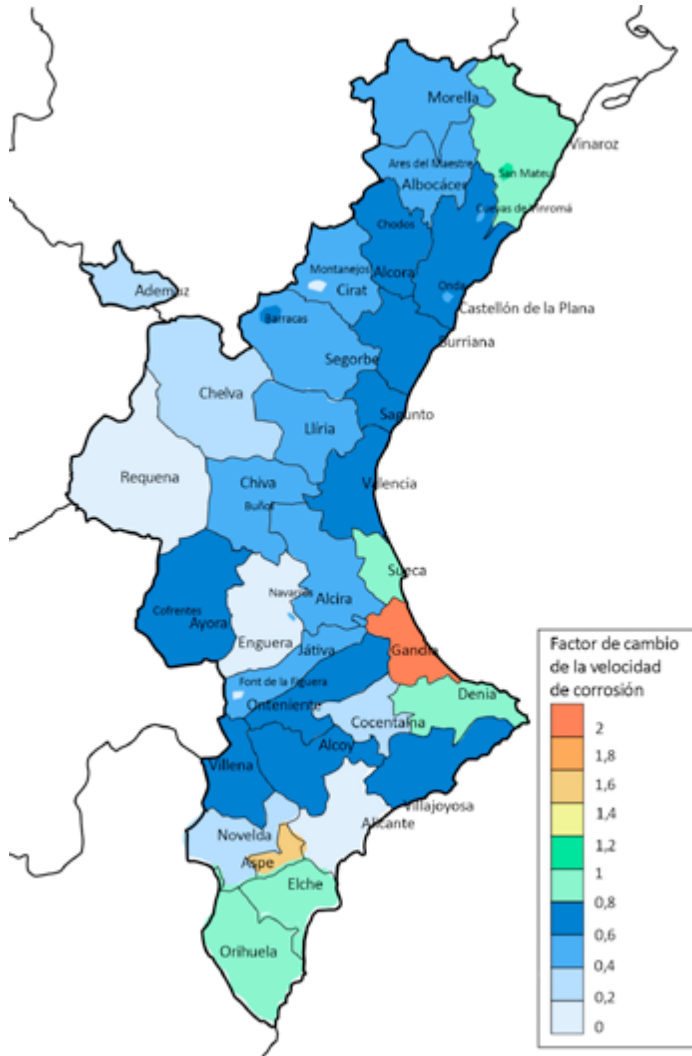


Figura 10.9. Mapa de corrosividad de la Comunitat Valenciana. Valores de factor de cambio de la velocidad de corrosión tomando como referencia el año 2005. Año 2050 Escenario RCP 4.5.

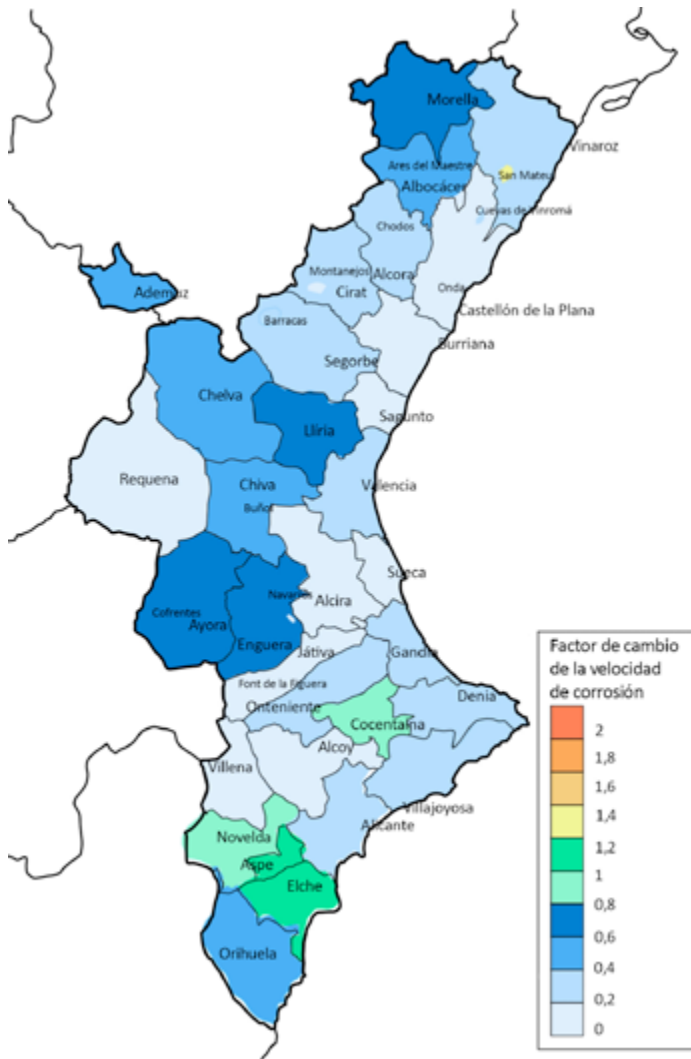


Figura 10.10. Mapa de corrosividad de la Comunitat Valenciana. Valores de factor de cambio de la velocidad de corrosión tomando como referencia el año 2005. Año 2100 Escenario RCP 4.5.

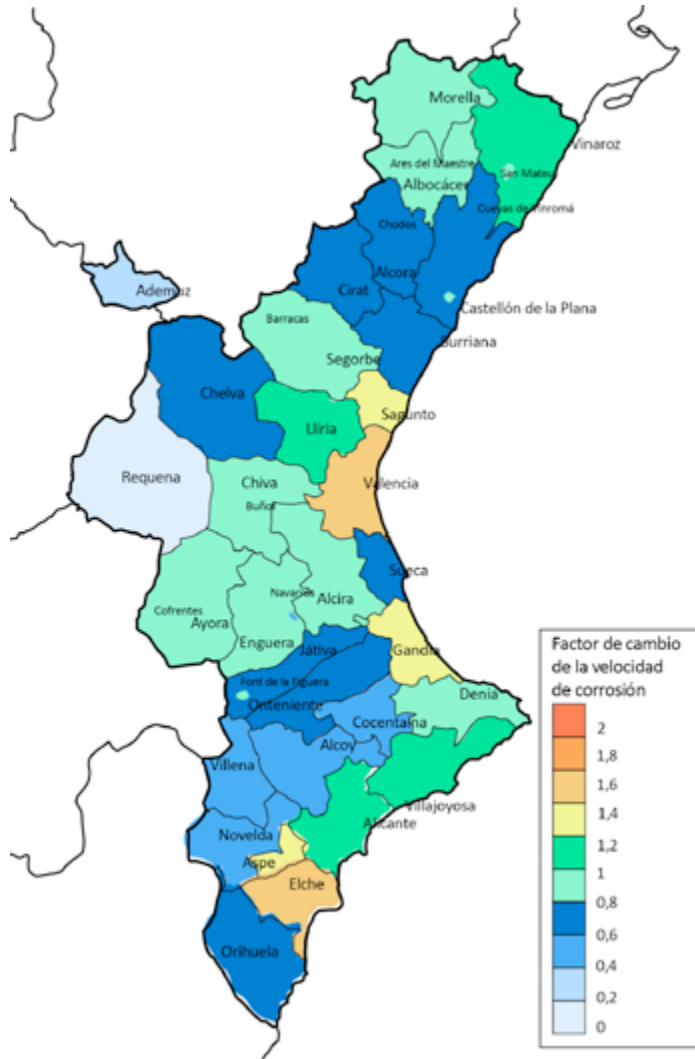


Figura 10.11. Mapa de corrosividad de la Comunitat Valenciana. Valores de factor de cambio de la velocidad de corrosión tomando como referencia el año 2005. Año 2050 Escenario RCP 8.5.

Sagunto, Vinaroz, Gandía, Elche, Aspe, Alicante, Enguera y Liria. Estos resultados ponen de manifiesto que la tendencia generalizada en ambos escenarios es la reducción de la velocidad de corrosión con el tiempo. Los extremos calculados en el escenario RCP4.5 son 0,001 (Sagunto, Villena y Alcoi) y 1,945 (Gandía) y en el escenario RCP8.5 son 0,011 (Coves de Vinromá) y 1,699 (Elche). Cabe señalar que los valores calculados para cada población en el escenario RCP4.5, más favorable debido a la menor emisión de GEI, por lo general, son más bajos que los hallados para el escenario RCP8.5. Ello implica que la disminución de la velocidad de corrosión será mayor en este primer escenario RCP4.5. El hecho de que se hayan obtenido valores tan bajos de F_c se justifica por la reducción prevista en ambos escenarios para la salinidad, asociada a la velocidad del viento y, sobre todo, por la progresiva disminución de las lluvias, esto es, de la tasa anual de horas con precipitaciones. En efecto, las proyecciones realizadas hasta la fecha indican que, en la Comunitat Valenciana, las precipitaciones incrementarán su intensidad, pero reducirán su frecuencia, lo que resultará en tasas anuales de precipitación menores².

Evolución temporal de cada escenario

Dada la variedad de comportamientos observados en las cuarenta poblaciones consideradas se ha optado por calcular los valores promedio de F_c en cada zona climática de la Comunitat Valenciana y se han representado las correspondientes curvas de variación con el tiempo para los dos escenarios considerados. De este modo, es posible visualizar mejor la evolución temporal de la velocidad de corrosión. Las figuras 10.13 y 10.14 muestran los resultados obtenidos:

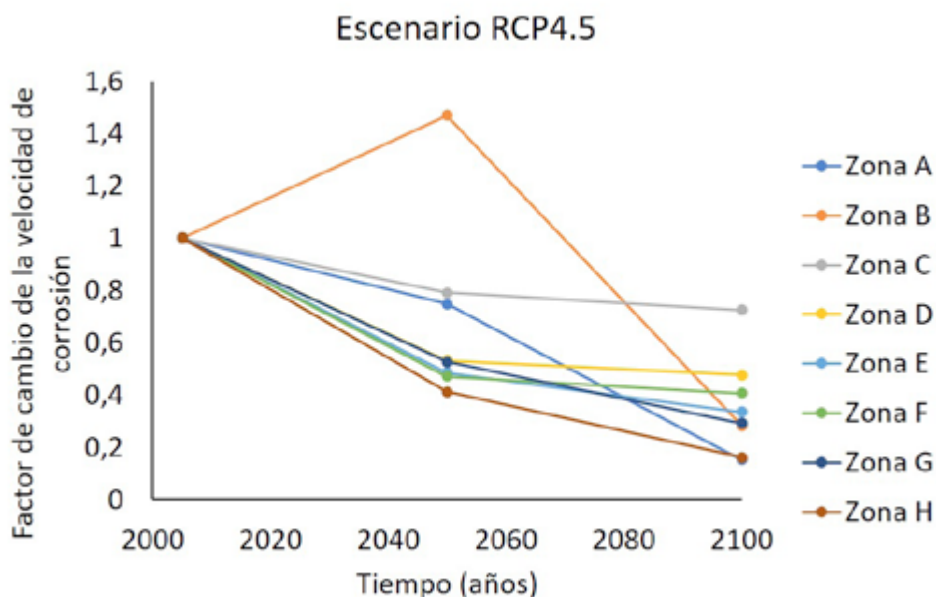


Figura 10.13. Valores promedio de F_c en cada región climática de la Comunitat Valenciana versus tiempo estimados para el escenario RCP4.5.

² Aunque se estima que habrá un incremento de los fenómenos meteorológicos extremos, la tasa anual de horas con precipitación será menor.

En la figura 10.13 se observa que el escenario RCP4.5 se caracteriza por una reducción progresiva de F_c hasta 2100 en todas las regiones climáticas excepto en la zona B donde este parámetro aumenta hasta 2050 con respecto al valor 1 de referencia correspondiente a 2005. A partir de esa fecha se observa que, a medida que se avanza en la segunda mitad del siglo, la disminución del factor de cambio se ralentiza excepto en la zona A en la que la progresiva disminución de F_c se acelera.

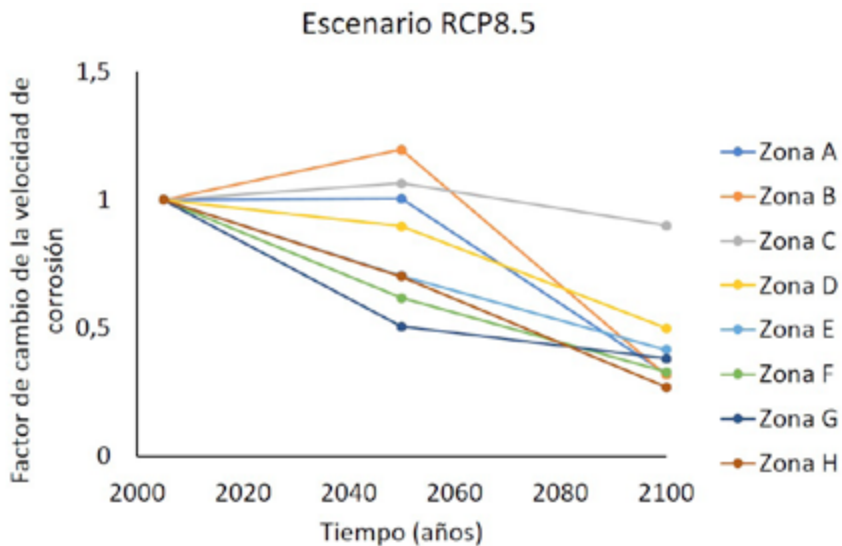


Figura 10.14. Valores promedio de F_c en cada región climática de la Comunitat Valenciana versus tiempo estimados para el escenario RCP8.5.

El escenario RCP8.5, representado en la figura 10.14, se caracteriza por una reducción progresiva de F_c hasta 2100 en todas las regiones climáticas excepto en las zonas A, B y C donde este parámetro aumenta hasta 2050 con respecto al valor 1 de referencia correspondiente a 2005. A partir de esa fecha se observa que, a medida que se avanza en la segunda mitad del siglo, la disminución del factor de cambio se acelera excepto en la zona G en la que la progresiva disminución de F_c se ralentiza.

Comparación entre comarcas

Las tablas 10.8 y 10.9 y las figuras 10.9 a 10.14 muestran que, en general, las zonas climáticas correspondientes a áreas del territorio en la línea de la costa, exhiben un comportamiento diferente a las zonas climáticas del interior de la Comunitat Valenciana. Esta divergencia se hace más acusada en la región B y, algo menos, en las regiones A y C. Estas tres zonas históricamente han venido registrando una mayor tasa de precipitaciones anuales y poseen mayores valores de salinidad.

10.7. Incertidumbre

Para conocer la validez de un modelo de proyección en el futuro de los efectos del cambio climático en la corrosión del acero es importante realizar una valoración de la

incertidumbre que está asociada a la estimación realizada mediante dicho modelo. El nivel de confianza de los resultados va a venir impuesto por el nivel de incertidumbre que tienen los datos que intervienen en el modelo desarrollado. Estas incertidumbres proceden principalmente:

- Incertidumbre de las proyecciones climáticas.
- Incertidumbre de los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (GEI).
- Incertidumbre de los modelos de corrosión empleados sin tener en cuenta el cambio climático.

La incertidumbre asociada a las proyecciones climáticas deriva de la correspondiente a los modelos de circulación general del clima terrestre y se suele fijar en un 30 %. La incertidumbre de los escenarios RCP del IPCC se sitúa en valores similares, mientras que la incertidumbre de los modelos de corrosión convencionales se encuentra en torno al 200 %, lo cual la sitúa muy por encima de las incertidumbres referentes al cambio climático (Nguyen *et al.*, 2013). Estos datos ponen de manifiesto que la incertidumbre de los resultados obtenidos principalmente se debe a los modelos teóricos de corrosión utilizados para construir el modelo de proyección. No obstante, a medida que se avance en el tiempo será posible ir ajustando dichos modelos, verificándolos con los datos experimentales disponibles y el valor de la incertidumbre disminuirá.

10.8. Conclusiones

A partir de los valores del factor de cambio de la velocidad de corrosión obtenidos en las cuarenta localidades estudiadas, se han estimado los valores promedio de los factores de cambio de la velocidad de corrosión para la Comunitat Valenciana tal como se muestra en la tabla 10.10.

Tabla 10.10. Factores de cambio promedio calculados en la Comunitat Valenciana para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en 2050 y 2100.

Año	Factor de cambio de la velocidad de corrosión	
	RCP4.5	RCP8.5
2050	0,411	0,701
2100	0,161	0,269

Se estima que en la Comunitat Valenciana se produzca un descenso generalizado de la velocidad de corrosión con algunos casos excepcionales en los que la velocidad de corrosión se incrementará alcanzando, en los casos más extremo, valores del factor de cambio en torno a 1,9 en ambos escenarios. Se estima que, en 2050, la velocidad de corrosión se reducirá en la Comunitat Valenciana en un valor promedio de 58,9 % en el escenario RCP4.5 y solo en un 29,7 %, en el escenario más desfavorable RCP8.5. En la segunda mitad del siglo XXI, la velocidad de corrosión seguirá descendiendo estimándose que se alcanzará un valor medio de descenso de 83,9 % en el escenario RCP4.5. En el escenario más desfavorable RCP8.5 la velocidad de corrosión seguirá también muy por debajo del valor observado en 2005 estimándose un valor medio de descenso de 73,1 %.

Al final del siglo XXI serán muy pocas las poblaciones en las que la velocidad de corrosión permanecerá por encima de la observada en el año de referencia 2005. Las poblaciones donde el descenso de la corrosividad será mayor se sitúan en las zonas climáticas del interior las cuales históricamente son menos lluviosas, mientras que, en algunas poblaciones situadas en las zonas climáticas costeras, con tendencia histórica a una mayor pluviosidad, podrá rebasarse el valor actual de velocidad de corrosión. La proyección realizada también estima que el descenso de la velocidad de corrosión será mayor en el escenario más favorable RCP4.5.

10.9. Referencias

AEMET (2015) Guía de usuarios de la base de datos Escenarios-PNACC. Disponible en: https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_mensuales?w=0&v=WSS&e=HIST&p=Todos&f=Todos&b=1. [Consultado 18-05-2023].

AEMET (2023) Gráficos de proyecciones regionalizadas de cambio climático. Disponible en: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat. [Consultado 18-05-2023].

AEMET (2017) Guía de usuario: Escenarios-PNACC Datos mensuales. ANEXO Regionalización CORDEX. https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_mensuales?w=0&v=WSS&e=HIST&p=Todos&f=Todos&b=1. [Consultado 18-05-2023].

Benarie, M. y Lipfert, F.L. (1986) "A general corrosion function in terms of atmospheric pollutant concentration and rain pH", *Atmospheric Environment*, 20(10), pp. 1947-1958.

Cole, I.y Corrigan, P. (2009) "Service life prediction of materials". En: Newton, P. *et al.*, Eds. *Technology, design and process innovation in the built environment*. New York: Taylor & Francis, pp. 72-96.

Cole, I.S. y Paterson D.A. (2010) "Possible effects of climate change on atmospheric corrosion in Australia", *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 45(1), pp. 19-26.

Cole, I.S., Chan, W.Y., Trinidad, G.S. y Paterson, D.A. (2004) "Holistic model for atmospheric corrosion Part 4 - Geographic information system for predicting airborne salinity", *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 39, pp. 89-96.

CORDEX (2023) Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment. Disponible en: <https://www.cordex.org>. [Consultado 20-05-2023].

Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) "AR5". En: Solomon, S., Qin, Manning, D.M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. y Miller, H. L. Eds. *Climate change 2007: The physical science basis*. New York: Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2023a) AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023.

Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. [Consultado 5-05-2023].

Intergovernmental Panel on Climate Change (2023b) AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf. [Consultado 6-05-2023].

McKay, W.A., Garland, J.A., Livesley, D., Halliwell, C.M. y Walker, M.I. (1994) "The characteristics of the shore-line sea spray aerosol and the landward transfer of radionuclides discharged to coastal sea water", *Atmospheric Environment*, 28(20), pp. 3299–3309.

Ngene, B.U., Ede, A.N., Kumar, P. y Imam, B. (2015) "Effect of Climate Change Pollutants on the Corrosion Rate of Steel in Rural, Urban and Industrial Environments", *Journal of Environment and Earth Science*, 5, pp. 16.

Nguyen, M.N., Wang, X. y Leicester, R.H. (2013) "An Assessment of Climate Change Effects on Atmospheric Corrosion Rates of Steel Structures", *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 48(5), pp. 359-369.

Nguyen, M.N., Leicester, R.H. Wang, X. y Foliente, G.C. (2011) "Corrosion effects in the structural design of metal fasteners in timber constructions", *Structure and Infrastructure Engineering* 9(3), pp. 276-285.

Rivero, S., Chico, B. de la Fuente, D. y Morcillo, M. (2007) "Corrosión atmosférica del acero bajo en carbono en un ambiente marino polar. Estudio del efecto del régimen de vientos", *Revista de metalurgia*, 43(5), pp. 370-383.

UNE-EN ISO 9225:2012 Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Medida de los parámetros ambientales que afectan a la corrosividad de las atmósferas. UNE Asociación Española de Normalización. Disponible en: <http://une.org>. [Consultado 6-05-2023].

Vidal, F., Vicente, R. y Mendes Silva, J. (2019) "Review of environmental and air pollution impacts on built heritage: 10 questions on corrosion and soiling effects for urban intervention", *Journal of Cultural Heritage*, 37, pp. 273–295.

WCRP (2023) Programa Mundial de Investigación del Clima. Disponible en: <http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr/>. [Consultado 5-05-2023].

10.10. Bibliografía

Sabbioni, C. (2008) "El Cambio Climático y las colecciones de los museos". En: *Dialogues for the New Century. Mesa redonda sobre la conservación del patrimonio cultural en un mundo cambiante*. IIC.

Varotsos, C., Tzanis, C., Cracknell, A. (2009) "The enhanced deterioration of the cultural heritage monuments due to air pollution". *Environmental Science and Pollution Research International*, 16(5), pp. 590-592.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



IRP INSTITUTO DE
RESTAURACIÓN DEL
PATRIMONIO
INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN



GENERALITAT
VALENCIANA



UNIVERSITAT
DE VALÈNCIA