



# **ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MUNICIPIO DE MADRID**

# **ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MUNICIPIO DE MADRID**

*Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental*

*Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad*

AYUNTAMIENTO DE MADRID

***Julio 2015***

*Portada (fotografía)*

Playas Madrid Río

© Madrid Visitors & Convention Bureau, 2011.

© NoPhoto

*Autores:*

*Tapia, C., Abajo, B., Feliu, E., Fernández, J. G., Padró, A., Castaño, J.*

*Trabajo realizado por:*

*Tecnalia Research & Innovation*

Contenido:

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.   | Introducción .....  | 4  |
| 2.   | Marco conceptual .....  | 6  |
| 3.   | Metodología resumida .....  | 8  |
| 4.   | Indicadores y datos utilizados .....  | 10 |
| 5.   | Resultados .....  | 14 |
| 5.1. | Impacto de olas de calor sobre la salud humana .....                          | 16 |
| 5.2. | Sequías y disponibilidad de agua y su impacto en la actividad económica ..... | 20 |
| 5.3. | Inundaciones y gestión de agua de tormentas en el medio construido .....      | 23 |
| 5.4. | Alteración/ modificación de ecosistemas y pérdida de biodiversidad .....      | 27 |
| 6.   | Conclusiones .....  | 30 |
| 7.   | Referencias bibliográficas .....  | 32 |

Anexos

- Anexo 1. Metodología detallada
- Anexo 2. Indicadores utilizados

# 1. Introducción

El Plan de Energía y Cambio Climático de la Ciudad de Madrid - Horizonte 2020 (Ayuntamiento de Madrid, 2014) identifica en su tercer capítulo las principales tendencias climáticas y los impactos derivados a los que previsiblemente deberá enfrentarse la ciudad a lo largo del presente siglo. Estas incluyen un descenso generalizado en las precipitaciones medias anuales, menos días con precipitaciones y más eventos con precipitaciones extremas, un incremento de la temperatura media mensual anual de las mínimas diarias, y un incremento en la media mensual anual de las temperaturas máximas, con la consiguiente disminución en el número de días en los que se registran episodios de heladas y un incremento sostenido en la duración de las olas de calor.

Estas alteraciones proyectadas por los modelos climáticos podrían afectar a la salud pública, con efectos directos relacionados con el estrés térmico, como las cardiopatías, y otros indirectos, y la propia pérdida de biodiversidad de la flora en los parques de la ciudad. Adicionalmente, las alteraciones climáticas pueden agravar problemas preexistentes como los de la contaminación atmosférica, disminuir las reservas de recursos hídricos en la región de Madrid, e incrementar el riesgo de inundaciones puntuales por lluvias torrenciales (op. cit. 2014).

Para responder a estos retos, el Plan de Energía y Cambio Climático establece un marco estratégico orientado a avanzar hacia una ciudad baja en carbono, a reducir la dependencia energética y fomentar la generación distribuida, a incrementar la eficiencia energética y el uso de energías renovables, a involucrar a la sociedad en el uso sostenible de la energía, a optimizar la gestión municipal en materia energética y ambiental, y a avanzar en la planificación de la adaptación al cambio climático. En este último sentido, el objetivo del Plan es proporcionar a los ciudadanos y las autoridades de Madrid herramientas específicas para prevenir y hacer frente a los impactos climáticos, respondiendo de este modo a los compromisos asumidos por la ciudad en el marco del compromiso europeo “Alcaldes por la Adaptación”, al que la ciudad de Madrid se adhirió en 2014.

De este modo, el Plan de Energía y Cambio Climático incluye como objetivo estratégico reducir la vulnerabilidad de la ciudad de Madrid frente a los efectos del cambio climático. El presente trabajo tiene como objetivo proporcionar una primera caracterización de la vulnerabilidad. Los factores que condicionan esta vulnerabilidad son analizados, identificando áreas de acción prioritaria. De forma complementaria, el análisis, pionero en España, establece las bases conceptuales y los cimientos metodológicos para la realización de este tipo de análisis en la escala urbana.

El documento se estructura en un total de cinco capítulos. El primero de ellos establece las bases conceptuales y define la terminología usada, de acuerdo con los estándares internacionalmente aceptados. A continuación se describe brevemente la metodología aplicada para caracterizar la vulnerabilidad en los 21 distritos del municipio. El siguiente capítulo introduce los indicadores y datos utilizados. Posteriormente se describen los resultados obtenidos para cada uno de los sectores analizados. Por último, se ofrecen una serie de conclusiones generales y se sugieren algunas alternativas de actuación para el futuro. El informe se acompaña de varios anexos que amplían la descripción metodológica, aportan más información sobre los indicadores utilizados y los representan cartográficamente.

## 2. Marco conceptual

Este análisis se alinea con el marco conceptual fijado en el Quinto Informe del IPCC sobre Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad (IPCC, 2014). Este marco se basa en una concepción del riesgo asociado al cambio climático entendiéndolo como el resultado de una “construcción social” (IPCC, 2012), tal y como se muestra en el siguiente gráfico:

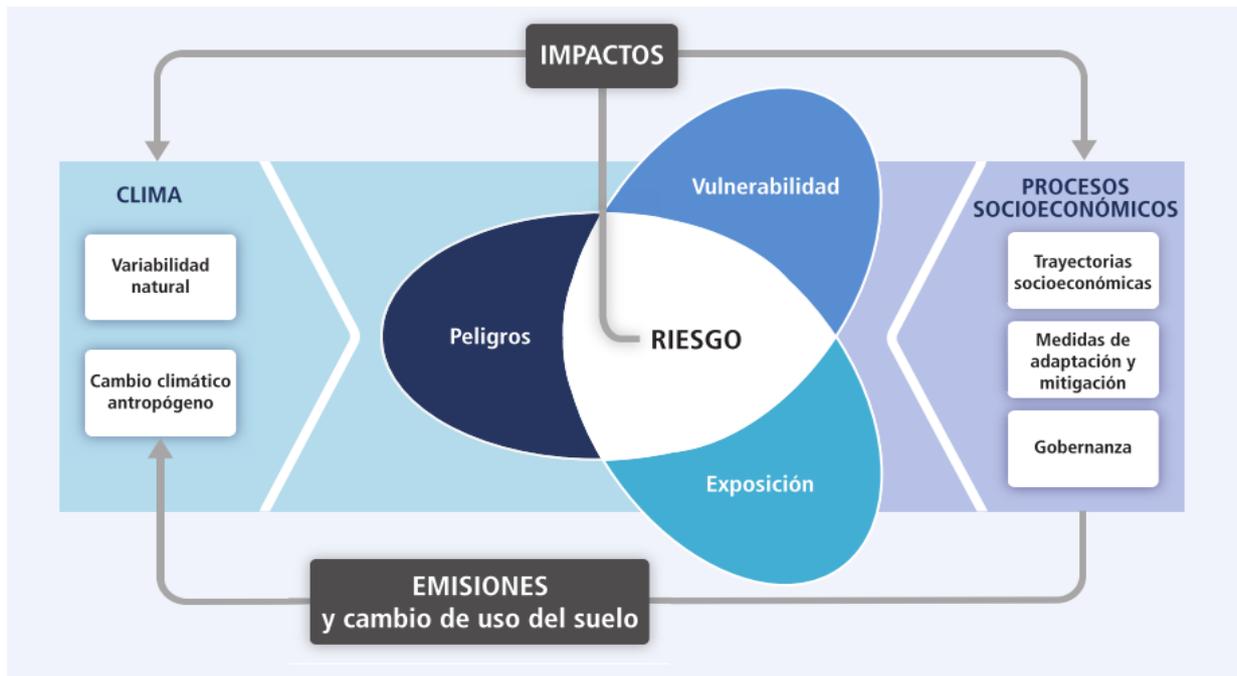


Gráfico 1 – Marco conceptual adoptado en este trabajo (IPCC, 2014, p. 3)

El glosario incluido en el Quinto Informe del IPCC proporciona las siguientes definiciones de los tres principales componentes del riesgo (IPCC, 2014, p. 5):

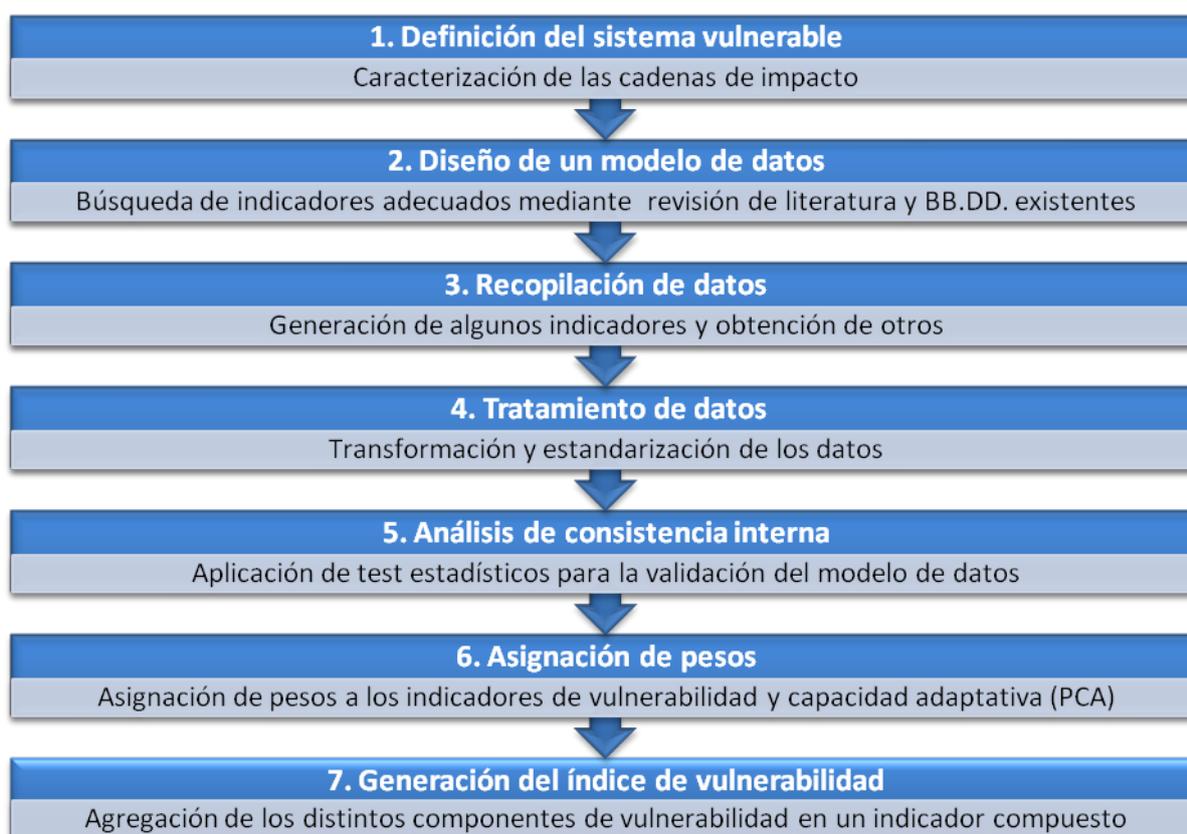
- **Peligro:** Acaecimiento potencial de un suceso o tendencia física de origen natural o humano, o un impacto físico, que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, prestaciones de servicios, ecosistemas y recursos ambientales. En el presente informe, el término peligro se refiere generalmente a sucesos o tendencias físicas relacionadas con el clima o los impactos físicos de este.
- **Exposición:** La presencia de personas; medios de subsistencia; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructuras; o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente.

- **Vulnerabilidad:** Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la **sensibilidad** o susceptibilidad al daño y la falta de **capacidad de respuesta y adaptación**.

El alcance de este estudio es evaluar la **vulnerabilidad ante el cambio climático como una combinación de la exposición, la sensibilidad y capacidad de respuesta y adaptación**.

### 3. Metodología resumida

La metodología empleada en este estudio, que se describe con mayor detalle en el Anexo 1, se caracteriza por la utilización de un conjunto de métodos cualitativos y técnicas de análisis estadístico combinadas bajo un marco metodológico estable que puede considerarse el estado del arte en los análisis de vulnerabilidad que se están realizando en el ámbito urbano a nivel internacional. El siguiente gráfico proporciona una visión secuencial de la metodología aplicada:



*Gráfico 2 – Secuencia metodológica aplicada*

Esta secuencia metodológica ha sido aplicada de forma iterativa a cada una de las cuatro “**cadenas de impacto**” analizadas:

1. **Olas de calor:** Impacto de olas de calor sobre la salud humana
2. **Sequías:** Sequías y disponibilidad de agua y su impacto en la actividad económica

3. **Inundaciones:** Inundaciones y gestión de agua de tormentas en el medio construido
4. **Degradación ambiental:** Alteración / modificación de ecosistemas y pérdida de biodiversidad

Para cada una de estas cadenas de impacto se ha generado un índice específico de vulnerabilidad ante el cambio climático obtenido mediante la combinación de variables representativas de los distintos componentes y receptores de los posibles impactos.

## 4. Indicadores y datos utilizados

Los indicadores incluidos en el análisis tratan de caracterizar la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa de los 21 distritos de Madrid ante los posibles efectos del cambio climático:

- Los indicadores que caracterizan la **exposición** han sido seleccionados en virtud de su capacidad para explicar en qué medida la población y elementos físicos del medio urbano y periurbano se encuentran directamente amenazados por los cambios previstos en las condiciones climáticas teniendo en cuenta la ubicación o emplazamiento de los receptores (población, medio construido, infraestructuras y medio natural).
- Los indicadores de **sensibilidad y capacidad adaptativa** describen los receptores de dichos impactos (población, medio construido e infraestructuras, y medio natural). Estos indicadores caracterizan su grado de fragilidad intrínseca y de su capacidad de resistencia o de recuperación ante los mismos, respectivamente.

Todos los indicadores seleccionados se refieren a factores que se engloban en alguna de las siguientes categorías:

- Factores sociales:
  - Composición de los hogares
  - Fragilidad y cohesión social
  - Pautas de consumo
  - Factores comportamentales (concienciación)
- Factores económicos:
  - Estructura económica
- Medio construido e infraestructuras:
  - Morfología urbana (compacidad)
  - Calidad constructiva
  - Accesibilidad a servicios y redes básicas
- Medio natural:
  - Calidad de los ecosistemas
  - Niveles de protección ambiental

- Otros factores:
  - Registros históricos de siniestros
  - Instrumentos de prevención existentes

La tabla siguiente presenta un listado completo de los indicadores considerados en el análisis, incluyendo la codificación empleada. La tabla permite observar a qué cadena de impacto y dimensión de la vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación) ha sido asignado cada indicador:

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MUNICIPIO DE MADRID

|              | Código y año          | Cadena de impacto     | Descripción   |
|--------------|-----------------------|-----------------------|---|
| Exposición   | MEAN_T_NOC_2013       | Olas de calor         | Isla de calor urbana. Datos de la temperatura nocturna (23 h)   |
|              | PROP_ESP_VER_2013     | Degradación ambiental | Proporción de superficie con espacios verdes (incluyendo espacios forestales)   |
|              | SUP_INUND_2015        | Inundaciones          | Proporción de superficie distrital potencialmente expuesta a inundaciones fluviales   |
|              | INV_ALT               | Inundaciones          | Inversa de la altura media del distrito (1/m)   |
| Sensibilidad | NDPs_20m2_2011        | Ola de calor          | Infravivienda. Porcentaje de "viviendas" con 20 m <sup>2</sup> o menos por habitante  |
|              | MORT_EST_2009_2013    | Ola de calor          | Tasa de mortalidad general por distrito ajustada del período 2009 – 2013 y estandarizada con la población estándar europea (11-30 indicada en Eurostat) |
|              | DISCAPACIDAD_2012     | Ola de calor          | Tasa de personas con algún grado de discapacidad (motriz, psíquica o sensorial) por cada 1.000 habitantes   |
|              | LLAM_SAMUR_1000_2013  | Ola de calor          | Media mensual de Llamadas telefónicas y Atenciones de Emergencias por distrito desde la Central de Samur Social por cada 1.000 habitantes               |
|              | TASA_SOLOS_2014       | Ola de calor          | Porcentaje de hogares integrados por un solo miembro  |
|              | TASA_MAS70_SOLOS_2014 | Ola de calor          | Porcentaje de personas con más de 70 años que viven solas   |
|              | TASA_MAYOR70_2014     | Ola de calor          | Porcentaje de población mayor de 70 años por distrito   |
|              | TASA_MENOR4_2014      | Ola de calor          | Porcentaje de población menor de 4 años por distrito  |
|              | PARO_2013             | Ola de calor          | Porcentaje de tasa de desempleo registrado (enero 2014)   |
|              | TASA_RMI_2013         | Ola de calor          | Tasa de perceptores de la Renta Mínima de Inserción (RMI) por cada 1.000 habitantes   |
|              | CONSUMOAGUA_2013      | Sequías               | Consumo medio de agua por distrito y año (litros/habitante/día)   |
|              | PLAZAS_HOTEL_2014     | Sequías               | Plazas hoteleras por cada 1.000 habitantes  |
|              | DENS_PISCI_2015       | Sequías               | Densidad de piscinas por hectárea   |
|              | INTENS_ECON_2013      | Sequías               | Número de afiliados a la Seguridad Social que trabajan en cada distrito sobre población total del distrito  |
|              | ACT_RESI_2013         | Sequías               | Equilibrio entre actividad y residencia. Porcentaje de edificabilidad de actividades económicas en el suelo urbano consolidado.                         |
|              | CAL_ECOS_2015         | Degradación ambiental | Calidad de los ecosistemas  |
|              | NOUR_PROT_2013        | Degradación ambiental | Superficie no urbanizable protegida (hectáreas)   |

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MUNICIPIO DE MADRID

|                      |                             |                       |  |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------|--|
|                      | PARQ_HIST_2013              | Degradación ambiental | Superficie cubierta por Parques Históricos incluidos en el Catálogo del Plan General de 1997 (hectáreas)   |
|                      | BOMB_AGU_X1000HAB_2000_2013 | Inundaciones          | Media de intervenciones anuales del cuerpo de bomberos por distrito por daños por agua por cada 1.000 habitantes (valor acumulado para el periodo 2000-2013) |
|                      | BOMB_AGU_PROP_2000_2014     | Inundaciones          | Proporción de intervenciones anuales del cuerpo de bomberos por distrito por agua (media del periodo 2000-2013)  |
|                      | VIVI_GARAJE_2011            | Inundaciones          | Porcentaje de viviendas que disponen de garaje   |
|                      | INF_CRIT_INUND_2015         | Inundaciones          | Proporción de infraestructuras críticas en zonas susceptibles de sufrir inundaciones fluviales   |
|                      | SUP_CONS_INUN_2015          | Inundaciones          | Proporción de superficie construida potencialmente expuesta a inundaciones por distrito  |
|                      | INFORM_INUND_2015           | Inundaciones          | Porcentaje de superficie de asentamientos informales potencialmente expuesta a inundaciones por desbordamiento de cauce                                      |
| Capacidad adaptativa | SUP_VER_CAP                 | Olas de calor         | Superficie verde por habitante (m <sup>2</sup> /habitante)   |
|                      | ASOC_VECIN_2013             | Olas de calor         | Tasa de asociacionismo vecinal. Número de asociaciones de vecinos por cada 10.000 habitantes   |
|                      | RENTA_2010                  | Olas de calor         | Renta Disponible Bruta per cápita (euros/habitante)  |
|                      | CEN_SALUD_2013              | Ola de calor          | Centros de salud por cada 100.000 habitantes   |
|                      | EST_SUP_2014                | Olas de calor         | Proporción de población con 25 o más años con titulación de Licenciado Universitario, Arquitecto o Ingeniero   |
|                      | FAC_VER_2013                | Olas de calor         | Porcentaje de superficie vegetada, no solo de las zonas verdes sino también la asociada a las superficies libres y a las cubiertas verdes                    |
|                      | SHANON_IND_2010             | Sequías               | Índice de diversidad de actividades industriales (Índice de diversidad de Shanon)  |
|                      | AGU_DOM_INDCOM_2014         | Sequías               | Proporción de consumo agua estimado doméstica sobre asimilado industrial más comercial   |
|                      | ACCESS_INC_2015             | Degradación ambiental | Accesibilidad a parques de bomberos  |
|                      | RED_AGU_RECIC_2011          | Degradación ambiental | Accesibilidad a la red de agua regenerada  |
|                      | PERMEABLE_2013              | Inundaciones          | Porcentaje de superficie permeable sobre total   |

Tabla 1 – Listado de indicadores utilizados en el análisis de vulnerabilidad

## 5. Resultados

La tabla que se muestra a continuación muestra los índices de vulnerabilidad agregada obtenidos para cada uno de los 21 distritos de Madrid y según las 4 cadenas de impacto analizadas. Los índices se expresan sobre una **escala de carácter relativo que oscila entre 1, para el distrito o distritos menos vulnerables, y 2, para el distrito o distritos más vulnerables.**

| Código | Distrito            | Olas de calor | Sequías | Degradación ambiental | Inundaciones |
|--------|---------------------|---------------|---------|-----------------------|--------------|
| 07901  | CENTRO              | 1,83          | 2,00    | 1,10                  | 1,50         |
| 07902  | ARGANZUELA          | 1,91          | 1,63    | 1,00                  | 1,56         |
| 07903  | RETIRO              | 1,76          | 1,39    | 1,13                  | 1,23         |
| 07904  | SALAMANCA           | 1,69          | 1,73    | 1,00                  | 1,37         |
| 07905  | CHAMARTIN           | 1,30          | 1,65    | 1,20                  | 1,28         |
| 07906  | TETUAN              | 1,72          | 1,61    | 1,20                  | 1,17         |
| 07907  | CHAMBERI            | 1,63          | 1,39    | 1,20                  | 1,34         |
| 07908  | FUENCARRAL-EL PARDO | 1,00          | 1,50    | 2,00                  | 1,29         |
| 07909  | MONCLOA-ARAVACA     | 1,05          | 1,90    | 1,54                  | 1,18         |
| 07910  | LATINA              | 1,41          | 1,44    | 1,13                  | 1,18         |
| 07911  | CARABANCHEL         | 1,96          | 1,15    | 1,03                  | 1,29         |
| 07912  | USERA               | 1,88          | 1,24    | 1,02                  | 1,56         |
| 07913  | PUENTE DE VALLECAS  | 2,00          | 1,09    | 1,05                  | 1,26         |
| 07914  | MORATALAZ           | 1,34          | 1,49    | 1,03                  | 1,00         |
| 07915  | CIUDAD LINEAL       | 1,45          | 1,49    | 1,03                  | 1,11         |
| 07916  | HORTALEZA           | 1,05          | 1,44    | 1,14                  | 1,05         |
| 07917  | VILLAVERDE          | 1,78          | 1,57    | 1,29                  | 2,00         |
| 07918  | VILLA DE VALLECAS   | 1,49          | 1,00    | 1,40                  | 1,97         |
| 07919  | VICALVARO           | 1,16          | 1,15    | 1,29                  | 1,28         |
| 07920  | SAN BLAS-CANILLEJAS | 1,43          | 1,37    | 1,18                  | 1,31         |
| 07921  | BARAJAS             | 1,15          | 1,95    | 1,43                  | 1,96         |

*Tabla 2 – Índices de vulnerabilidad agregada para cada cadena de impacto*

A continuación se incluye una serie cartográfica que representa los indicadores agregados de vulnerabilidad obtenidos para cada cadena de impacto. Con el objetivo de lograr una representación homogénea de los resultados, los valores han sido agrupados en percentiles, de forma que cada categoría de vulnerabilidad incluida en la leyenda de los mapas (Alta, Media-alta, Media-baja y Baja) comprende un número aproximadamente igual de distritos.

Esta clasificación en cuatro categorías simplifica la representación cartográfica, pero impide observar de forma visual las diferencias entre los valores relativos registrados por cada distrito. Por este motivo, se han generado una serie de gráficos complementarios que acompañan posteriormente a cada mapa. Estos gráficos permiten apreciar las diferencias relativas entre los valores de los índices de vulnerabilidad obtenidos para cada distrito (la longitud total de las barras), y la influencia relativa de cada variable sobre el índice agregado de vulnerabilidad (las subdivisiones de las barras). De este modo, cada columna queda dividida en sectores definidos por los indicadores de exposición, sensibilidad y capacidad de respuesta/adaptación, respectivamente.

## 5.1. Impacto de olas de calor sobre la salud humana

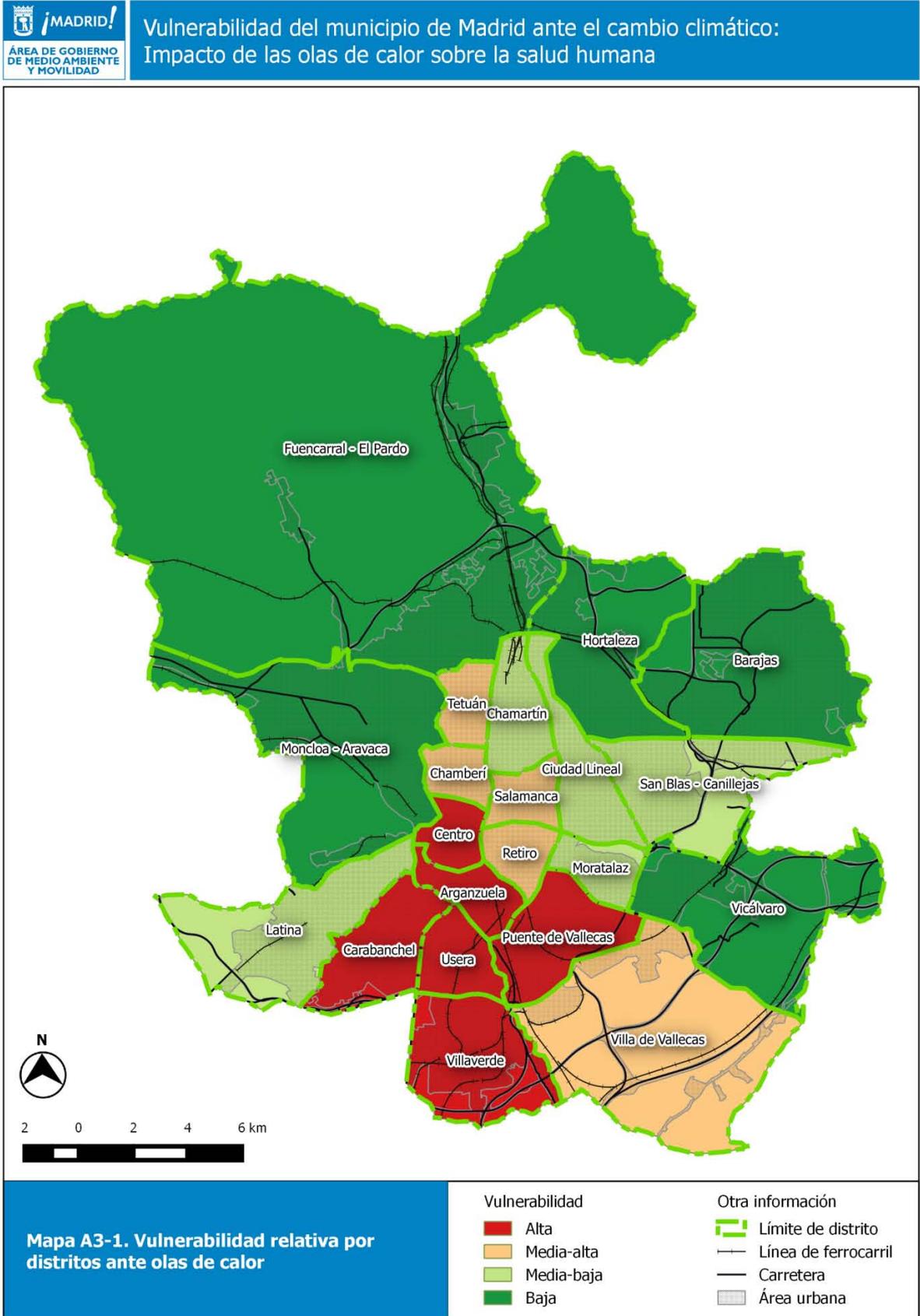
Los impactos previstos sobre la salud humana como consecuencia del incremento en el número e intensidad de las olas de calor vinculados al cambio climático se traducen en un aumento de las tasas de mortalidad y morbilidad (EEA, 2012). Desde un punto de vista de la salud humana, estas olas de calor, cuya duración media aumentará en la ciudad de Madrid a lo largo de las próximas décadas (Fischer & Schär, 2010), fundamentalmente provocan estrés cardiovascular. Este estrés puede traducirse en un incremento de las tasas de infarto y muerte prematura (O'Neill & Ebi, 2009). Otros efectos documentados son afecciones al sistema nervioso, problemas respiratorios, complicaciones en enfermedades preexistentes como la diabetes, entre otros (Deschenes, 2014). Ejemplos como los más de 80.000 víctimas que provocó de la ola de calor que sufrió Europa en el verano de 2003 acreditan esta relación entre las olas de calor y los daños sobre la salud humana (Wolf & McGregor, 2013).

En el ámbito urbano se producen además una serie de factores de agravamiento del fenómeno. En especial, el efecto “isla de calor”<sup>1</sup> puede agudizar los daños producidos por los episodios de calor extremo, dado que este fenómeno incrementa la exposición de la población a mayores temperaturas nocturnas y una mayor variabilidad de las temperaturas dentro de las distintas zonas de la ciudad que, en último término, incrementan el riesgo para la salud y la mortalidad general (Klein Rosenthal, Kinney, & Metzger, 2014; Patz, Campbell-Lendrum, Holloway, & Foley, 2005; Uejio et al., 2011). Por ello, factores como la densificación urbana, las condiciones habitacionales de los inmuebles o la accesibilidad a los espacios verdes son condicionantes que pueden incrementar o reducir los efectos de las olas de calor en las ciudades.

Además de los condicionantes morfológicos urbanos, es importante tener en cuenta que la capacidad de autorregulación térmica es mayor en algunas personas que en otras. En especial, la población anciana y los niños tienen menos capacidad para disminuir su temperatura corporal que los adultos (Uejio et al., 2011). Del mismo modo, las condiciones físicas pre-existentes y los hábitos de vida (vestimenta, tasas de consumo de alcohol, etc.), así como de las propias capacidades económicas y culturales de la población son otros factores a tener en cuenta a la hora de caracterizar la vulnerabilidad de la población ante el incremento en la intensidad y frecuencia de olas de calor asociadas al cambio climático (EEA, 2012; Jacobs, Kazmierczak, Krellenberg, Kuhlicke, & Peltonen, 2012; Schauser et al., 2010).

---

<sup>1</sup> El efecto isla de calor es el fenómeno mediante el cual se registran temperaturas medias superficiales más elevadas en el interior de las zonas urbanas más densamente pobladas, respecto de las zonas limítrofes no urbanizadas.



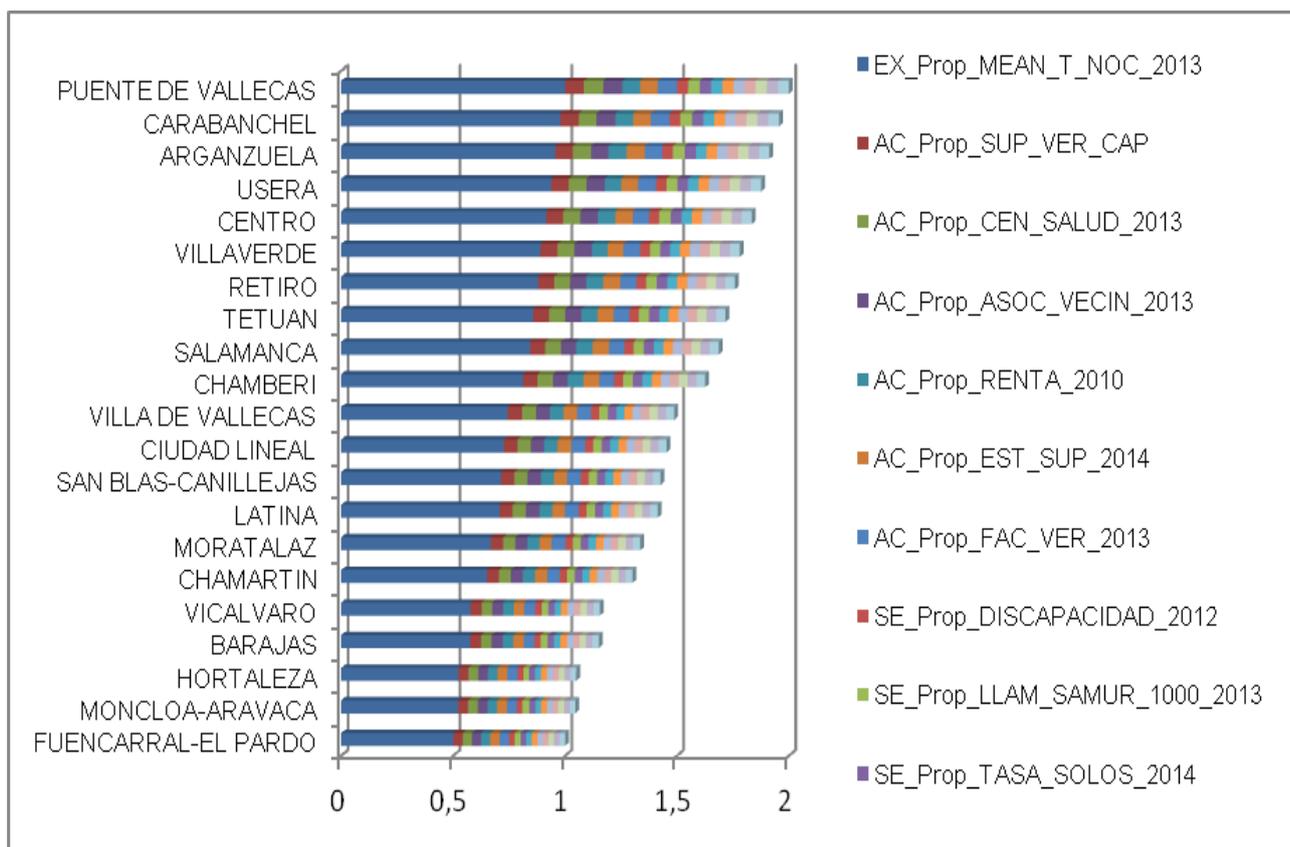


Gráfico 3 – Índice agregado de vulnerabilidad asociado con el impacto de las olas de calor

En el caso específico de la ciudad de Madrid, la distribución espacial de los factores descritos por medio de indicadores ilustrativos de los mismos muestra cómo son los distritos del centro y sur de la ciudad aquellos que resultan más vulnerables ante esta amenaza. Estos distritos comparten algunas de las siguientes características:

- En primer lugar, es en estas zonas donde se alcanzan unas temperaturas medias nocturnas más elevadas.
- Asimismo, se trata de distritos que, en general, concentran valores altos en los siguientes indicadores de sensibilidad contemplados: porcentaje de viviendas con 20 m<sup>2</sup> o menos por habitante, tasa de perceptores de la Renta Mínima de Inserción, porcentaje de población desempleada, tasa de personas con algún grado de discapacidad o porcentaje de población menor de 4 años.
- En relación con los indicadores de capacidad de respuesta y adaptación ante olas de calor, son distritos con unos porcentajes muy bajos de superficie verde por habitante (como Centro y Arganzuela) y con valores inferiores de renta bruta por habitante (caso de Carabanchel, Usera, Villaverde o Puente de Vallecas).

En el análisis se han identificado tres distritos con una vulnerabilidad significativamente inferior al resto de distritos ante olas de calor: Fuencarral-El Pardo, Moncloa-Aravaca y Hortaleza. Estos distritos se caracterizan por las siguientes características: temperaturas medias nocturnas más bajas, localización de áreas forestales y áreas verdes y valores inferiores de indicadores de sensibilidad de carácter económico (renta, población desempleada, población dependiente, etc.).

## 5.2. Sequías y disponibilidad de agua y su impacto en la actividad económica

El impacto de las sequías vinculadas al cambio climático es menos obvio que el de las olas de calor. Si bien existe abundante literatura sobre el grado de afección de este tipo de eventos en distintas regiones del mundo y bajo distintos escenarios de cambio climático sobre actividades como la agricultura y otras afines (A Iglesias, Moneo, & Quiroga, 2009), todavía han sido poco estudiados los impactos que las sequías vinculadas al cambio climático pueden ocasionar en los entornos urbanos (Kallis, 2008). En la Comunidad de Madrid el Canal de Isabel II ha elaborado ya al menos un estudio concreto sobre la vulnerabilidad del sistema de suministro madrileño ante el cambio climático (Luis Garrote de Marcos & Iglesias-Picazo, 2012).

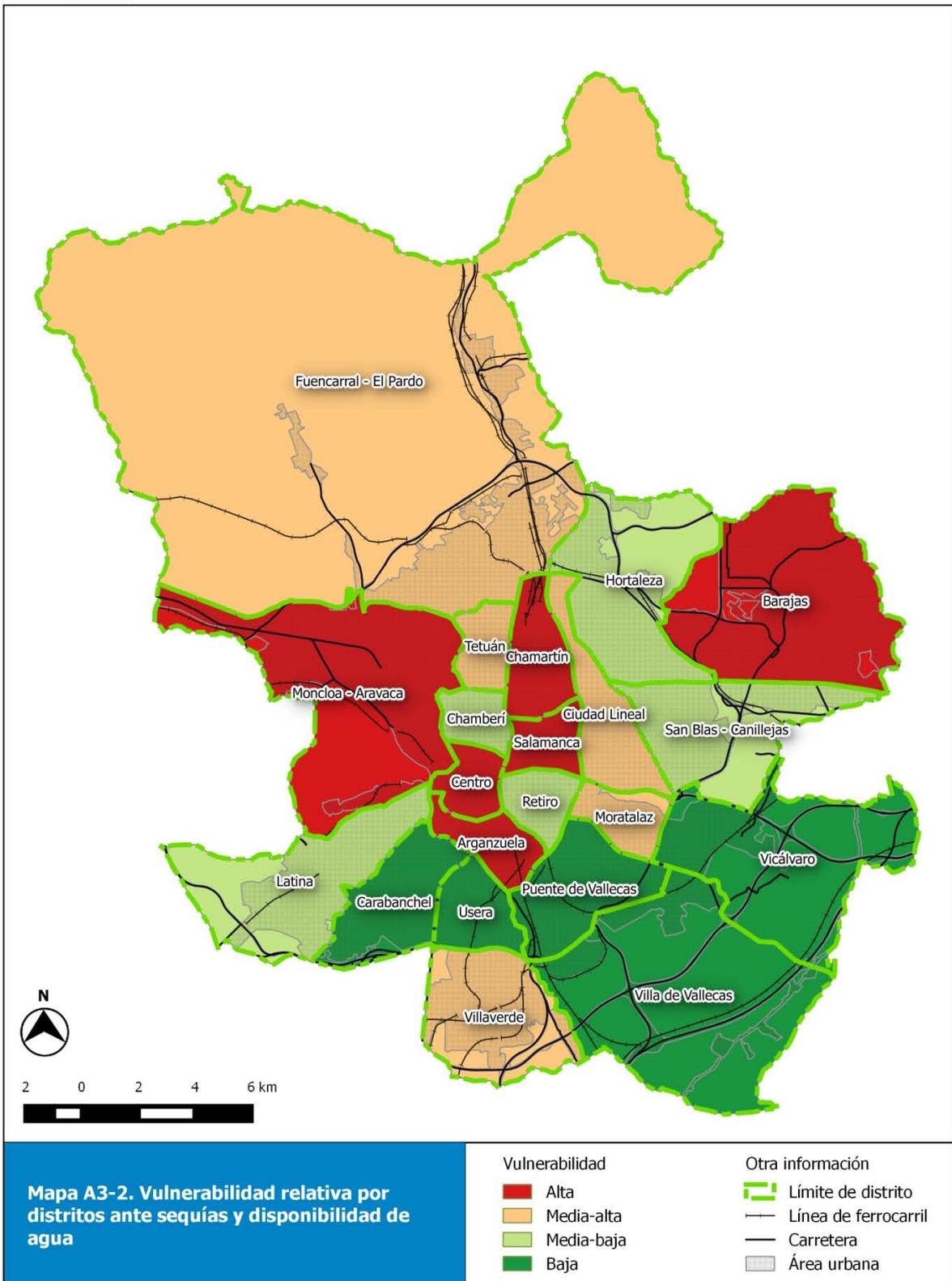
Las últimas restricciones de agua para garantizar el abastecimiento de agua a la población en la Comunidad de Madrid fueron establecidas en septiembre de 2005 (véase Decreto 97/2005, de 29 de septiembre del Consejo de Gobierno de la Comunidad de Madrid) y consistieron en las siguientes prohibiciones de uso:

- 1) Riego de parques o jardines, públicos y privados, salvo en jardines históricos o en los que se emplee riego por goteo, agua recuperada o procedente de pozo.
- 2) Riego o baldeo de viales, calles o aceras.
- 3) Fines puramente ornamentales en fuentes o instalaciones que carezcan de sistemas de recuperación o circuito cerrado.
- 4) Uso para aparatos de refrigeración que carezcan de sistemas de recuperación o circuito cerrado.
- 5) Llenado o vaciado de piscinas públicas o privadas

En mayo de 2006 se dejaron sin efecto parcialmente algunas de estas medidas y en noviembre de ese mismo año, se dejaron sin efecto todas.

Aunque se desconocen las medidas concretas de aplicación en un escenario actual de escasez de recursos hídricos, se ha optado por realizar una valoración del impacto sobre el sector industrial y comercial de la ciudad, entendiendo que, tras los usos destinados al riego, los usos con fines económicos serían aquellos más penalizados en un hipotético escenario de restricciones, por encima del consumo doméstico.

Cabe destacar que el Ayuntamiento de Madrid y el Canal de Isabel II desarrollan importantes actuaciones en materia de aprovechamiento de recursos hídricos alternativos. Destaca especialmente la red de reutilización de aguas depuradas de aproximadamente 180 km. de infraestructuras subterráneas. La red permite el abastecimiento de la ciudad con agua regenerada para el riego de zonas verdes, baldeo de viales, limpieza de alcantarillado y estanques de tormentas, así como otros usos autorizados (riego de campos de golf, viveros, etc.).



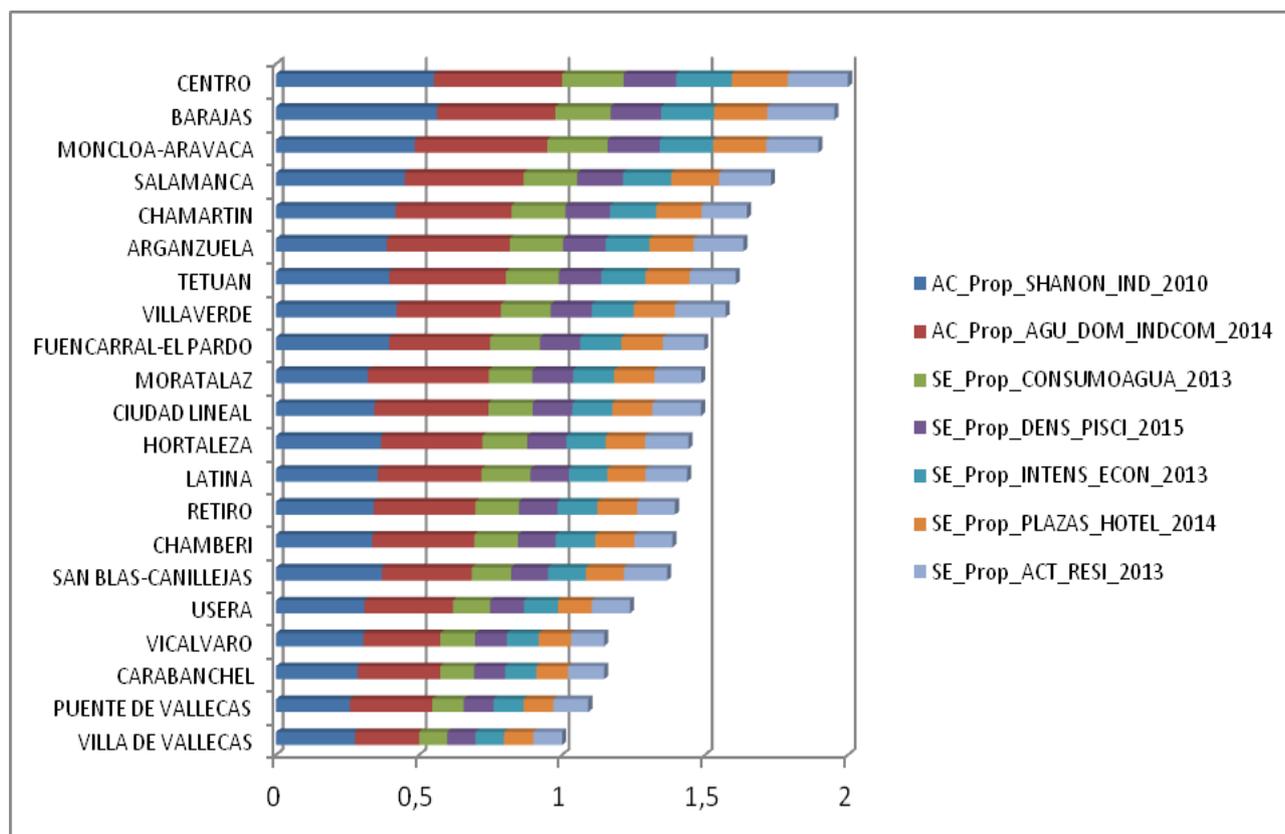


Gráfico 4 – Índice agregado de vulnerabilidad asociado con sequías y disponibilidad de agua

En el marco descrito anteriormente, la vulnerabilidad ante las sequías de los distintos distritos refleja con bastante precisión la propia distribución de la actividad y orientación económicas de los mismos. A continuación, se revisan algunas de las principales conclusiones de este análisis:

- Los distritos en los que se concentra una importante actividad económica de la ciudad (Chamartín, Salamanca, Centro, Chamberí, Barajas) tendrían una mayor sensibilidad a esta cadena de impacto: especialmente aquellos que cuentan con una mayor dependencia de actividades turísticas y hosteleras (Centro y Barajas).
- Hay una serie de distritos con un mayor consumo de agua medio por habitante y año (Latina, Arganzuela, Tetuán, Fuencarral, Chamartín) y en algunos se localiza una concentración alta de piscinas de uso recreativo (Chamartín, Hortaleza, Ciudad Lineal, Moncloa-Aravaca).
- Por otra parte, en el sur del municipio, se identifican algunos de los distritos con una mayor proporción de consumo de agua doméstico sobre asimilado industrial y comercial (Latina, Carabanchel, Usera, Puente de Vallecas) y por tanto, la actividad económica en estos distritos se vería afectada en un menor grado.

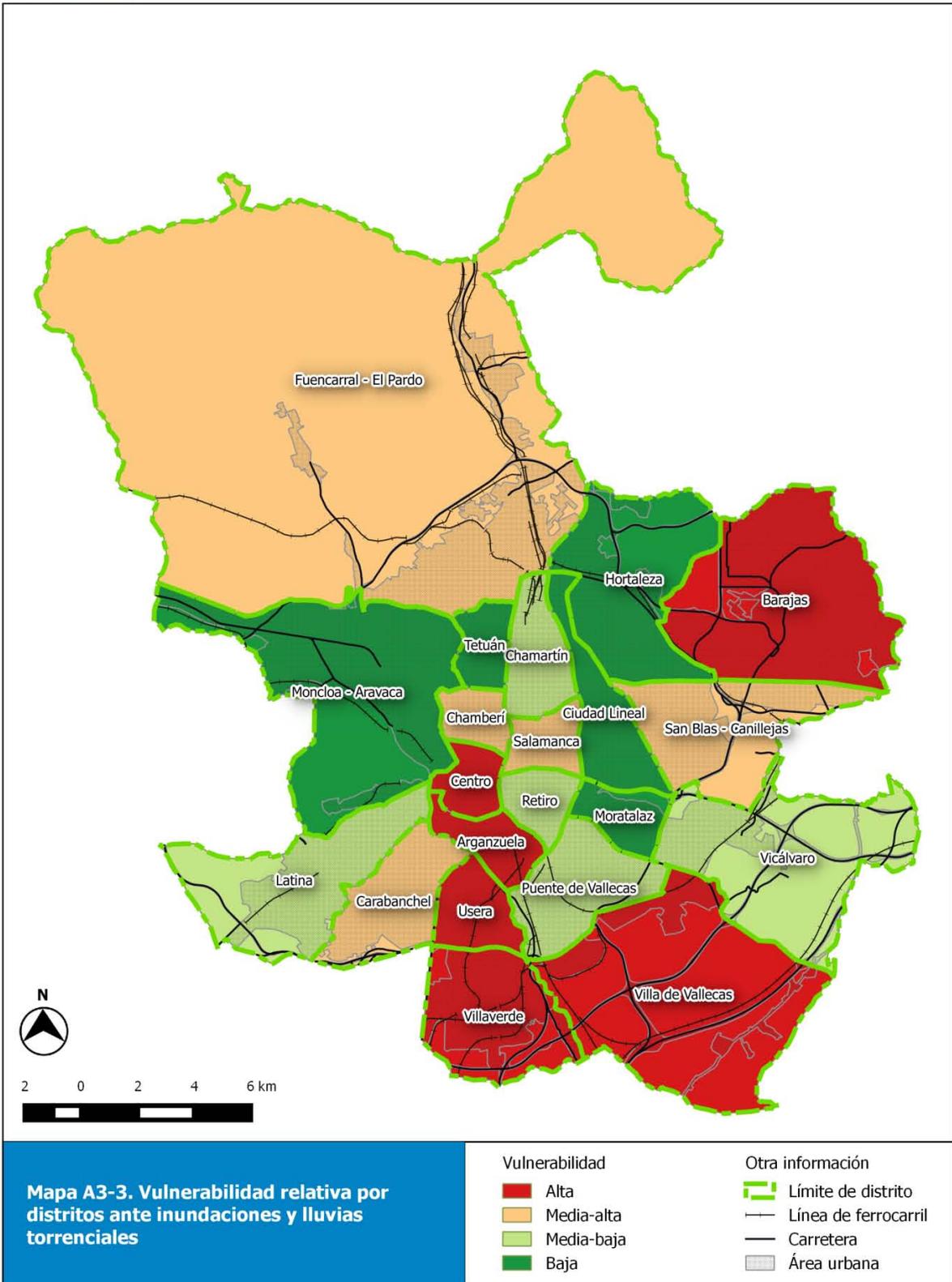
### **5.3. Inundaciones y gestión de agua de tormentas en el medio construido**

En general, la amenaza por inundaciones vinculadas al cambio climático ha sido muy estudiada por la importancia que tiene en términos de peligrosidad. Las últimas estimaciones disponibles para el conjunto de Europa han calculado que los daños causados por las inundaciones previstas en nuestro continente lo largo de este siglo, estimados bajo distintos escenarios de cambio climático, podrían ascender a unos 236 mil millones de euros, incluyendo tanto las inundaciones de origen fluvial como marino con periodo de retorno de 100 años (Mokrech, Kebede, Nicholls, Wimmer, & Feyen, 2015).

No obstante, estos daños no se registrarán de forma uniforme por todo el continente. Los estudios disponibles indican que los daños se concentrarán en las zonas costeras del centro-norte europeo. Por el contrario, se espera que en el interior de los países del centro-sur, y especialmente en la Península Ibérica, las inundaciones causadas por el desbordamiento de cauces fluviales disminuyan como consecuencia de una moderada reducción de las precipitaciones y la escorrentía superficial que los modelos predicen (Mokrech et al., 2015).

Existe no obstante un gran desconocimiento acerca del impacto que podrían ocasionar las inundaciones provocadas por las precipitaciones extremas, de carácter muy localizado espacialmente, que en España probablemente aumentarán en intensidad como consecuencia del cambio climático (Argüeso, Hidalgo-Muñoz, Gámiz-Fortis, Esteban-Parra, & Castro-Díez, 2012).

Es por este conjunto de factores que el análisis de vulnerabilidad ante las inundaciones ha sido orientado en este estudio hacia la caracterización de aquellos eventos de carácter excepcional, tanto de origen fluvial como pluvial, y al impacto de los mismos sobre las infraestructuras y el medio construido, que con una alta probabilidad sería los principales receptores de dichos impactos.



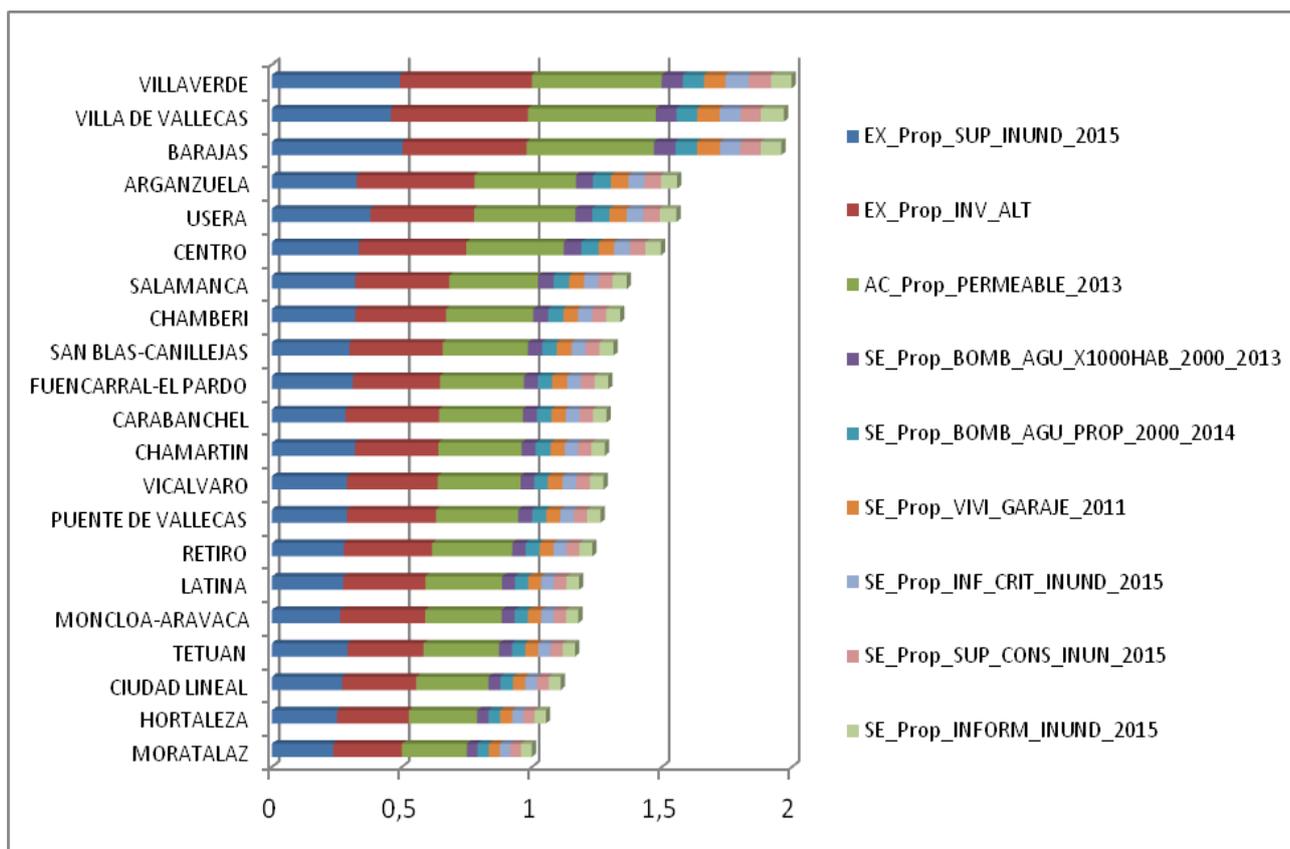


Gráfico 5 – Índice agregado de vulnerabilidad asociado con sequías y disponibilidad de agua

Los distritos que muestran una mayor vulnerabilidad ante las inundaciones son aquellos caracterizados por los siguientes factores explicativos:

- Se trata de distritos con una fracción de su superficie expuesta directamente a inundaciones de origen fluvial, de acuerdo con la cartografía de zonas inundables actualmente disponible en el Ministerio de Medio Ambiente (en fecha mayo de 2015). Llevados por el principio de precaución, se ha tomado el periodo de retorno de 500 años como referencia para el análisis. Con todo, en Madrid son pocos los distritos que cuentan con zonas inundables de estas características, y en todos ellos las zonas potencialmente afectadas son muy pequeñas (Barajas, Villaverde, Usera, Villa de Vallecas, Puente de Vallecas, Moncloa-Aravaca, San Blas-Canillejas, Fuencarral-El Pardo).
- Son distritos en los que algunas infraestructuras críticas se ubican en zonas potencialmente inundables, en particular en el distrito de Villaverde, donde algunas infraestructuras ferroviarias de la línea 3 de Metro y las líneas de cercanías 3, 4 y 5 se ubican en zonas potencialmente inundables. Lo mismo sucede en el distrito de Vallecas con las infraestructuras de soporte ferroviario

del AVE. A estas infraestructuras directamente afectadas por posibles inundaciones fluviales habría que añadir todas aquellas infraestructuras de transporte soterradas total o parcialmente, como túneles y pasos subterráneos, que pueden verse periódicamente afectadas por encharcamientos durante fenómenos de lluvias torrenciales debido a un drenaje insuficiente.

- Son distritos propensos a sufrir inundaciones causadas por eventos de precipitación extrema, en virtud de una inferior altitud media (Villaverde, Usera, Arganzuela, Barajas, Villa de Vallecas) y/o una mayor proporción de viviendas con garaje (Villa de Vallecas, Barajas, Fuencarral-El Pardo, Arganzuela, Hortaleza, Moncloa-Aravaca).
- Se trata de distritos con alguna zona urbanizada, asentamiento informal o infraestructura crítica ubicada en zonas inundables (Villaverde y Villa de Vallecas).
- Estos distritos presentan un registro histórico de daños por inundaciones e intervenciones de los bomberos causadas por daños por agua (Centro, Salamanca, Chamartín, Retiro, Arganzuela, Tetuán).
- Se caracterizan por presentar suelos poco permeables, con pocos espacios verdes o libres que permitan el filtrado del agua (Chamberí, Fuencarral-El Pardo, Chamartín, Salamanca, Centro).

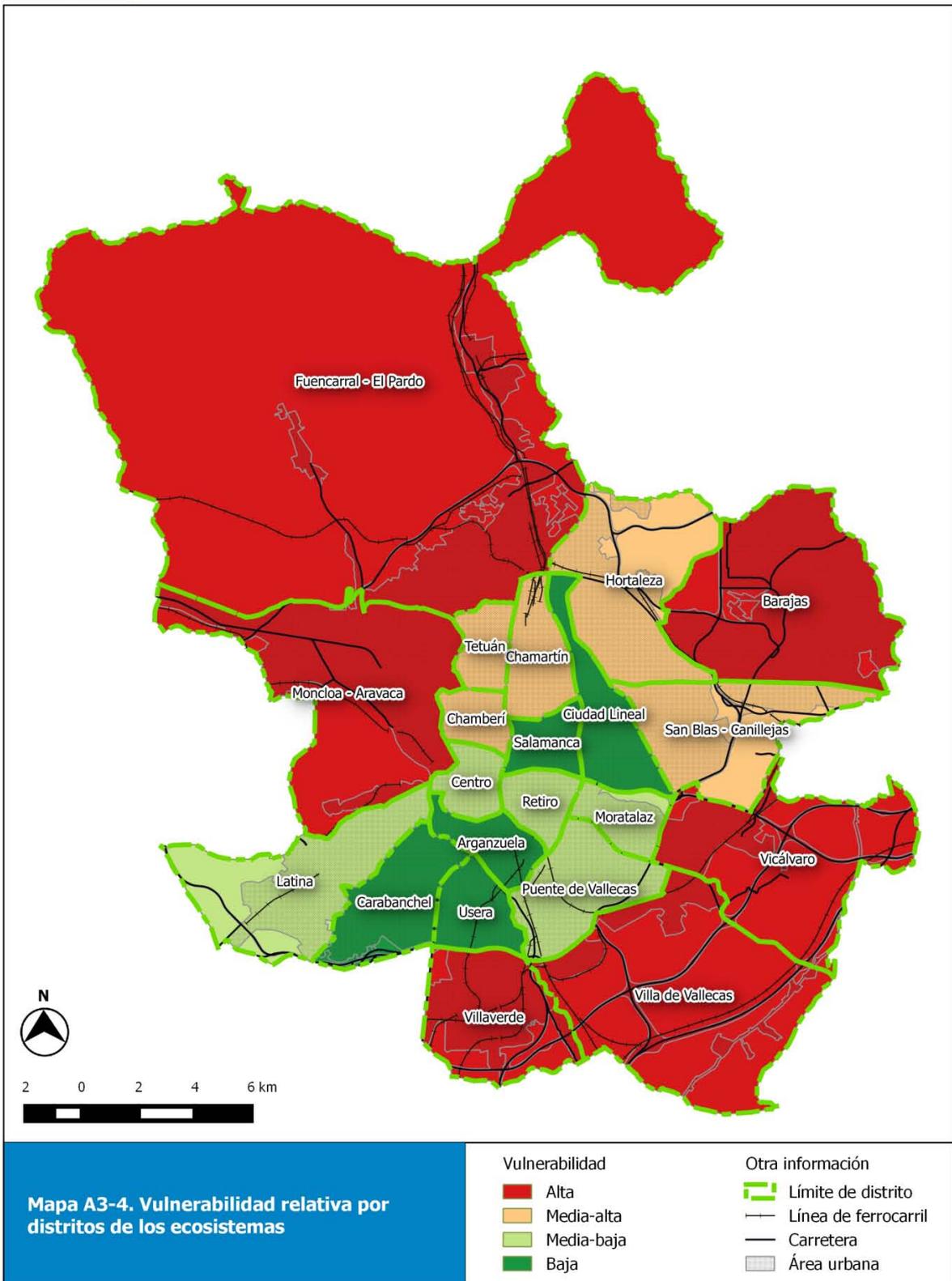
## **5.4. Alteración/ modificación de ecosistemas y pérdida de biodiversidad**

Madrid cuenta con 6.480 hectáreas de zonas verdes públicas, clasificadas en función de su consideración urbanística, gestión y características como Parques y Jardines Históricos, Parques Singulares, Parques Forestales y Parques de Distrito. La óptima gestión y mantenimiento de esta superficie de zonas verdes aporta grandes beneficios de carácter medio ambiental a la ciudad ya que juega un papel importante en la regulación del clima, la renovación del aire de la ciudad y la atenuación de los niveles de contaminación y como hábitat de las especies que componen la fauna y flora de la ciudad.

Es importante destacar que la ciudad también alberga espacios naturales protegidos de alto valor ecológico como el Monte del Pardo que con una extensión de 16.000 hectáreas ocupa casi una cuarta parte de la superficie de la ciudad. También hay que destacar otros espacios naturales como Soto de Viñuelas, colindante con el Monte del Pardo, y una pequeña franja del Parque regional del Sureste ubicada en el término municipal de Madrid

Todos estos ecosistemas sufrirán impactos asociados al cambio climático. Estos pueden ser tanto de tipo directo, como por ejemplo la pérdida de hábitats, con la consiguiente migración o pérdida de especies, como indirectos, como el mayor riesgo de incendios forestales vinculado al prolongamiento de la estación estival.

De acuerdo con este planteamiento general, en el caso concreto de Madrid los distritos más vulnerables resultan ser aquellos que cuentan con un mayor acervo natural y muy especialmente el distrito de Fuencarral-El Pardo, que posee unas características claramente diferenciales respecto al resto en este sentido.



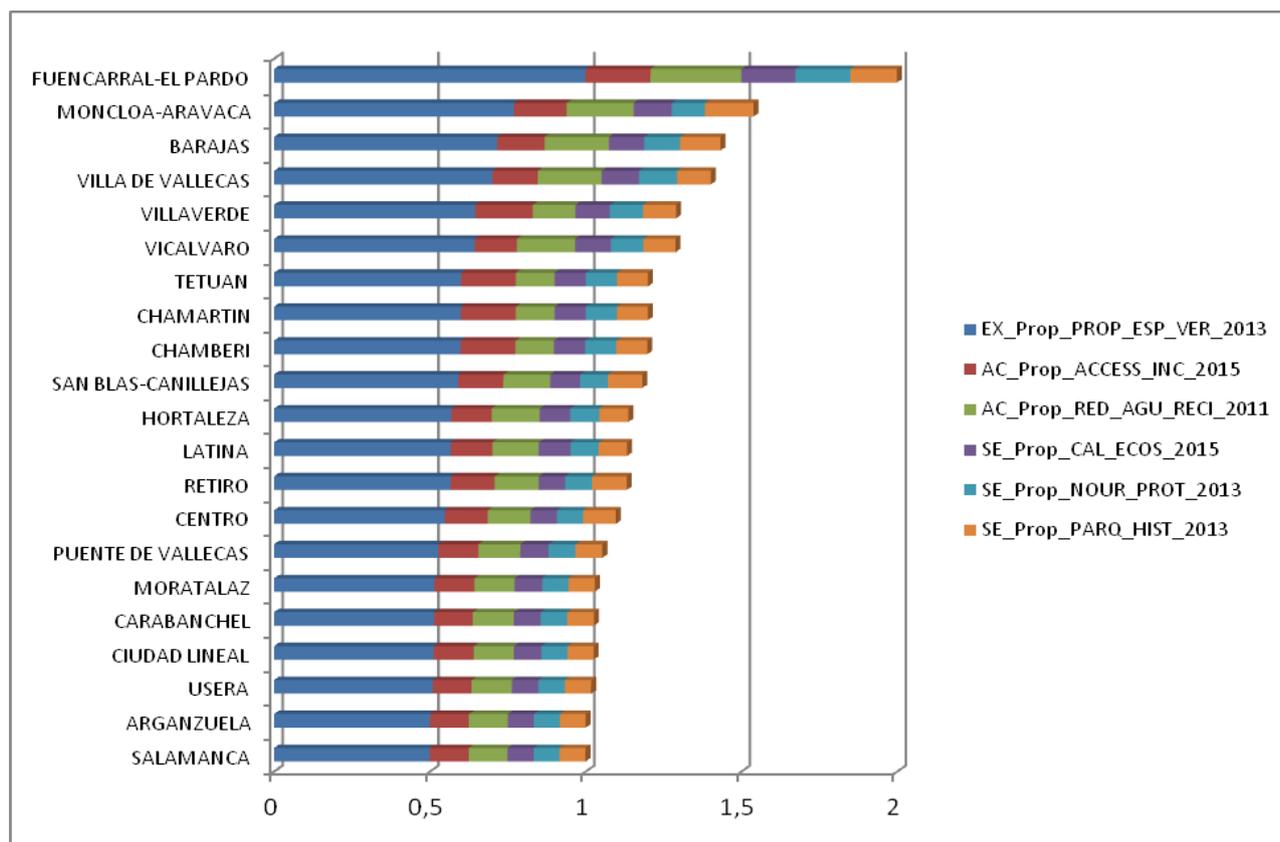


Gráfico 6 – Índice agregado de vulnerabilidad asociado con la alteración/modificación de ecosistemas y pérdida de biodiversidad

Además de Fuencarral-El Pardo, los restantes distritos periféricos de la ciudad también aparecen representados como distritos vulnerables, porque poseen elementos naturales sensibles (Barajas, Moncloa-Aravaca, Vicalvaro, Villa de Vallecas y Villaverde). Algunos de ellos, como Villa de Vallecas y Barajas, además de Fuencarral-El Pardo, poseen incluso elementos naturales englobados en alguna figura legal de protección. Junto a ellos cabe destacar los distritos que cuentan con parques históricos (Moncloa-Aravaca, Retiro, San Blas-Canillejas, Barajas, Centro), los cuales también muestran índices de vulnerabilidad superiores a la media.

## 6. Conclusiones

El presente trabajo ha permitido identificar algunos distritos de atención prioritaria bajo cada una de las cadenas de impacto analizadas. Combinando y generalizando los resultados obtenidos se puede observar cómo algunas zonas, en particular los distritos del sur y centro, junto con Barajas, presentan determinadas características estructurales recurrentes que les hacen ser especialmente vulnerables al cambio climático: una mayor exposición de personas y bienes a las distintas amenazas, una composición social caracterizada por una población más sensible y/o una menor capacidad de respuesta/ adaptación ante distintos impactos.

Dado que las características estructurales de estos distritos tienen influencia sobre varias cadenas de impacto (ej. composición social, calidad del parque edificatorio, nivel de conservación de las infraestructuras, etc.), y teniendo en cuenta que los distritos más vulnerables de la ciudad están además entre los distritos más poblados, parece oportuno considerar estos distritos como zonas de atención prioritaria.

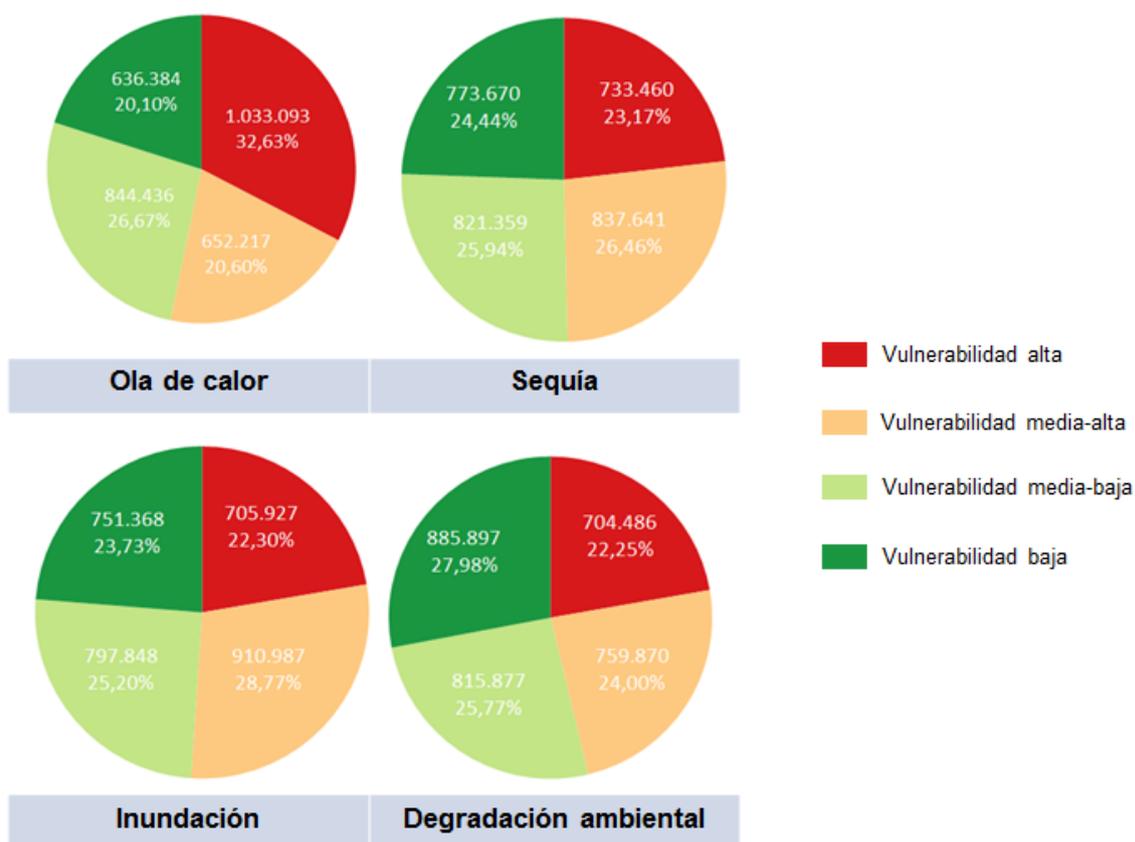


Gráfico 7 – Número de personas y porcentaje de población expuesta a distintas amenazas.

En cualquier caso, es recomendable avanzar más en el conocimiento de la vulnerabilidad/riesgo, especialmente para la gestión de los riesgos relacionados con las olas de calor y las inundaciones. Tal y como se refleja en el gráfico 7, para estas dos amenazas la suma de personas expuestas a una vulnerabilidad alta o media-alta superaría la cifra de 1.600.000 personas y un porcentaje del 50 % de la población total del municipio.

Por lo que atañe a los riesgos relacionados con la gestión de los ecosistemas y el agua, parece necesario proceder mediante el establecimiento de alianzas y redes de actores sectoriales que permitan abordar la problemática desde una perspectiva sistémica, avanzando en el conocimiento de las interdependencias sectoriales. En el caso concreto del medio natural, en cuya gestión participan un buen número de actores públicos de nivel municipal, regional e incluso nacional, es fundamental lograr una buena coordinación entre todos ellos. Ello permitiría diseñar estrategias de adaptación compartidas y coordinadas, basadas en criterios de gestión adaptativa, integrando los criterios de adaptación en los propios planes existentes y garantizando la conectividad ecológica de todo el sistema de espacios naturales del municipio.

En el caso de las sequías sería conveniente avanzar en el conocimiento de los posibles impactos del cambio climático sobre el recurso hídrico, actualizando las proyecciones a la luz de los últimos escenarios climáticos disponibles, para aplicar en su caso las medidas de adaptación y los ajustes necesarios sobre el sistema de suministro. El Canal de Isabel II deberá necesariamente liderar este proceso, en el ejercicio de sus competencias. Ello permitiría a los municipios realizar estudios específicos sobre las interdependencias y los posibles efectos colaterales de las posibles amenazas.

## 7. Referencias bibliográficas

- Argüeso, D., Hidalgo-Muñoz, J. M., Gámiz-Fortis, S. R., Esteban-Parra, M. J., & Castro-Díez, Y. (2012). High-resolution projections of mean and extreme precipitation over Spain using the WRF model (2070-2099 versus 1970-1999). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D12), n/a–n/a. doi:10.1029/2011JD017399
- Ayuntamiento de Madrid. (2014). Plan de Energía y Cambio Climático en la Ciudad de Madrid. Horizonte 2020.
- Deschenes, O. (2014). Temperature, human health, and adaptation: A review of the empirical literature. *Energy Economics*, 46, 606–619. doi:10.1016/j.eneco.2013.10.013
- EEA. (2012). *Urban adaptation to climate change in Europe. Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies*. Luxembourg.
- El-Zein, A., & Tonmoy, F. N. (2015). Assessment of vulnerability to climate change using a multi-criteria outranking approach with application to heat stress in Sydney. *Ecological Indicators*, 48, 207–217. doi:10.1016/j.ecolind.2014.08.012
- Fischer, E. M., & Schär, C. (2010). Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience*, 3(6), 398–403. doi:10.1038/ngeo866
- Iglesias, A., Moneo, M., & Quiroga, S. (2009). *Coping with Drought Risk in Agriculture and Water Supply Systems*. (A. Iglesias, A. Cancelliere, D. A. Wilhite, L. Garrote, & F. Cubillo, Eds.) *Coping with Drought Risk in Agriculture and Water Supply Systems* (Vol. 26). Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-1-4020-9045-5
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, & Q. Dahe, Eds.). Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139177245
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. (C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, ... L. L. White, Eds.). Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.

- Jacobs, C., Kazmierczak, A., Krellenberg, K., Kuhlicke, C., & Peltonen, L. (2012). *Urban Vulnerability Indicators A joint report of ETC-CCA and ETC-SIA*.
- Kallis, G. (2008). Droughts. *Annual Review of Environment and Resources*, 33(1), 85–118. doi:10.1146/annurev.enviro.33.081307.123117
- Klein Rosenthal, J., Kinney, P. L., & Metzger, K. B. (2014). Intra-urban vulnerability to heat-related mortality in New York City, 1997-2006. *Health & Place*, 30C, 45–60. doi:10.1016/j.healthplace.2014.07.014
- Luis Garrote de Marcos, & Iglesias-Picazo, A. (2012). *Adaptación al cambio climático: Identificación de medidas de adaptación a partir de los impactos sobre los recursos hídricos en la Comunidad de Madrid*. Madrid: Fundación Canal.
- Mokrech, M., Kebede, A. S., Nicholls, R. J., Wimmer, F., & Feyen, L. (2015). An integrated approach for assessing flood impacts due to future climate and socio-economic conditions and the scope of adaptation in Europe. *Climatic Change*, 128(3-4), 245–260. doi:10.1007/s10584-014-1298-6
- O'Neill, M. S., & Ebi, K. L. (2009). Temperature Extremes and Health: Impacts of Climate Variability and Change in the United States. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 51(1), 13–25. doi:10.1097/JOM.0b013e318173e122
- OECD. (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD Publishing.
- Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438(7066), 310–317. doi:10.1038/nature04188
- Schauser, I., Otto, S., Schneiderbauer, S., Harvey, A., Hodgson, N., Robrecht, H., ... McCallum, S. (2010). *Urban Regions: Vulnerabilities, Vulnerability Assessments by Indicators and Adaptation Options for Climate Change Impacts. Scoping Study* (No. 2010/12). Bilthoven, The Netherlands: European Topic Centre on Air and Climate Change (ETC/ACC).
- Uejio, C. K., Wilhelmi, O. V., Golden, J. S., Mills, D. M., Gulino, S. P., & Samenow, J. P. (2011). Intra-urban societal vulnerability to extreme heat: the role of heat exposure and the built environment, socioeconomics, and neighborhood stability. *Health & Place*, 17(2), 498–507. doi:10.1016/j.healthplace.2010.12.005
- Wolf, T., & McGregor, G. (2013). The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom. *Weather and Climate Extremes*, 1(August 2003), 59–68. doi:10.1016/j.wace.2013.07.004

# Anexos

## Anexo 1. Metodología detallada

La metodología empleada en este estudio ha sido aplicada de forma iterativa a cada una de las cuatro cadenas de impacto analizadas. Esta secuencia incluye los siguientes pasos:

### A1.1. Definición del sistema vulnerable

En primer lugar se ha generado un modelo de impacto para las distintas amenazas climáticas consideradas. Los modelos de impacto han sido elaborados por parte de Tecnalía atendiendo a su conocimiento experto sobre las características principales del clima actual y futuro – y de las consecuencias probables vinculadas al mismo –, conjuntamente con los técnicos municipales del Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad del Ayuntamiento de Madrid, en virtud de su mejor conocimiento del contexto urbano receptor de dichos impactos como consecuencia de una modificación de las condiciones climáticas.

De forma complementaria, este proceso colaborativo ha permitido también priorizar los posibles impactos de acuerdo a su relevancia objetiva sobre determinados aspectos sociales, físicos y ambientales, a su importancia histórica, y a la existencia de medidas ya aplicadas (léase red de agua reciclada para contrastar las sequías, los tanques de tormenta para evitar avenidas catastróficas, etc.).

En términos operativos, ello se ha traducido en el diseño de un conjunto de **modelos causales para cadena de impacto**, relacionando los posibles impactos derivados de la modificación de las condiciones climáticas y los receptores de los mismos. Ello ha permitido identificar y caracterizar por medio de indicadores cuatro áreas prioritarias de análisis expresadas en formas de una serie de “cadenas de impacto”:

1. Olas de calor: Impacto de olas de calor sobre la salud humana
2. Sequías: Sequías y disponibilidad de agua y su impacto en la actividad económica
3. Degradación ambiental: Alteración / modificación de ecosistemas y pérdida de biodiversidad
4. Inundaciones: Inundaciones y gestión de agua de tormentas en el medio construido

## A1.2. Diseño de un modelo de datos

Una vez caracterizados los modelos de causalidad y definidas las cadenas de impacto, se ha procedido a la búsqueda, selección e identificación de indicadores adecuados para caracterizar los distintos factores que las integran. Para tal fin se ha realizado una revisión bibliográfica de más de 100 artículos científicos. El resultado de esta revisión bibliográfica es resumido en la tabla siguiente:

|   |    |
|---|----|
| <b>Capital humano</b>   |    |
| <b>Estructura y dinámica demográfica, y estado de salud</b> (esperanza de vida, las tasas de dependencia, las tasas de fecundidad, crecimiento demográfico, estructura familiar y doméstica, nutrición, poblaciones con necesidades especiales, etc.)   | 36 |
| <b>Raza y/o etnia</b> (tasas migratorias, cohesión social, barreras lingüísticas, etc.)   | 6  |
| <b>Indicadores de género</b> (relaciones de género, igualdad de ingresos, indicadores de participación femenina en la vida pública, etc.)   | 10 |
| <b>Percepción del riesgo y concienciación ambiental</b> (ej. tasas de reciclaje, concienciación ambiental, formación en gestión de riesgos, etc.)   | 11 |
| <b>Educación, competencias y conocimiento</b> (capacitación, alfabetización, tasas de escolarización, conocimiento de idiomas, conocimiento comunitario, etc.)  | 24 |
| <b>Gobernanza</b>   |    |
| <b>Derechos humanos</b> (respeto a las minorías y libertad de prensa)   | 2  |
| <b>Gobernanza y calidad del gobierno</b> (incluyendo indicadores sobre participación de los ciudadanos, existencia de organizaciones sociales y calidad de las instituciones, existencia de valores comunitarios, estabilidad política, índices de corrupción, niveles de confianza en las autoridades, voluntariado, etc.) | 25 |
| <b>Planes, políticas e instrumentos</b> (políticas, herramientas, incentivos y desincentivos, normativa de zonificación y construcción, programas de conservación, existencia de medidas y planes de adaptación, gastos ambientales, sistemas de alivio de desastres, sistemas de alerta temprana, etc.)                    | 15 |
| <b>Aspectos socioeconómicos</b>   |    |
| <b>Condiciones socioeconómicas</b> (PIB per cápita, niveles de ingreso y renta per cápita, índices de desigualdad y pobreza, niveles de cohesión social, personas sin hogar, ocupación en actividades de bajos ingresos, desempleo,...)   | 40 |
| <b>Indicadores macroeconómicos</b> (PIB, superávit presupuestario, activos financieros, nivel de endeudamiento, inversiones, comercio internacional, tasas de negocio, estructura y diversificación económica, etc.)  | 17 |
| <b>Sistemas de aseguramiento y transferencia del riesgo</b> (incluidos los sistemas de seguridad social, las transferencias sociales, los seguros privados y otros gastos de orientación social)  | 10 |
| <b>Acceso a la vivienda</b> (gastos de vivienda, índices de tenencia y modelos de propiedad, plazos de amortización de préstamos, etc.)   | 3  |
| <b>Tecnología</b> (acceso a la tecnología y las inversiones en nuevas tecnologías, incluyendo los gastos de I+D, patentes, recursos humanos en I+D, etc.)   | 11 |
| <b>Medio construido</b>   |    |
| <b>Estructura de la vivienda</b> (tipologías de vivienda, densidades, etc.)   | 12 |
| <b>Infraestructuras</b> (disponibilidad, calidad, incluyendo las características de las redes y el medio construido, la accesibilidad a las infraestructuras críticas, etc.)  | 28 |
| <b>Natural capital</b>  |    |
| <b>Servicios ecosistémicos</b> (uso de la tierra, productividad de los recursos, producción agrícola, recursos pesqueros, etc.)   | 25 |
| <b>Estado del medio ambiente</b> (niveles de degradación ambiental, emisiones, especies en peligro de extinción, etc.)  | 9  |

Tabla 3 – Número de artículos científicos revisados.

Partiendo de este trabajo, y en coherencia con el modelo conceptual propuesto por el IPCC (ver Gráfico 1), han sido seleccionados una serie de indicadores de exposición y vulnerabilidad para cada cadena de impacto, entendiendo que las condiciones de peligrosidad (posibles alteraciones en las condiciones climáticas futuras respecto a las actuales) no presentan variabilidad entre los distintos distritos.

Por otra parte, teniendo en cuenta por un lado la ausencia de modelización detallada para algunos de los peligros o amenazas consideradas –principalmente para las inundaciones y el fenómeno de isla de calor– y, por otro lado, la escasa variabilidad espacial que cabe esperar en otros de los peligros considerados –especialmente el de las sequías–, en este estudio se ha prescindido de indicadores de peligrosidad futura, asumiendo que los cambios en los regímenes climáticos afectarán de forma equivalente a los distintos distritos de la ciudad de Madrid.

Los indicadores de vulnerabilidad han sido posteriormente subdivididos en indicadores de sensibilidad e indicadores de capacidad adaptativa. La asignación de los indicadores dentro de estas dos últimas categorías ha sido realizada mediante una clasificación basada en un sencillo criterio dicotómico: los indicadores que hacen incrementar la vulnerabilidad con un aumento en su magnitud han sido clasificados como indicadores de sensibilidad. La lógica opuesta ha sido aplicada a los indicadores cuyo incremento en magnitud disminuye la vulnerabilidad. Estos han sido clasificados como indicadores de capacidad adaptativa. Los indicadores que se construyen empleando las mismas variables de origen para informar sobre tendencias socioeconómicas, ambientales o físicas de signo opuesto o mutuamente excluyentes (e.j. renta por habitante versus índice de pobreza o índice de impermeabilidad versus espacios verdes), han sido incorporados una sola vez en el modelo de vulnerabilidad, bien como indicadores de sensibilidad o de capacidad adaptativa. Con ello se ha perseguido aumentar la coherencia interna del modelo de datos, evitando la incorporación de información redundante, considerando al mismo tiempo el mayor número de dimensiones posible en el análisis.

### **A1.3. Recopilación de datos**

Una vez descritas las cadenas de impacto e identificados los indicadores necesarios para su caracterización, se ha procedido a analizar la disponibilidad de información local. Este ha sido un proceso colaborativo e iterativo desarrollado conjuntamente entre Tecnalía y el Ayuntamiento de Madrid, que ha aportado fuentes de información, ha sugerido posibles indicadores y ha validado algunos de los propuestos por Tecnalía.

Se ha compilado un total de 55 indicadores, de los cuales finalmente se han utilizado en el análisis un total de 39, incluyendo 4 indicadores de exposición, 24 indicadores de

sensibilidad y 11 indicadores de capacidad de respuesta/adaptación. El Anexo 2 proporciona información detallada acerca de estos 39 indicadores. Una vez estructurada la base de datos, los indicadores han sido sometidos a un tratamiento estadístico complejo empleando el software de análisis de datos R. El procesamiento ha incluido los análisis que se exponen a continuación.

## A1.4. Preparación de datos

La preparación de los datos ha consistido en la aplicación secuencial de los siguientes procesos:

1. **Transformación:** la transformación es una técnica de manipulación de datos que busca la normalización de la distribución, de forma que la nueva distribución satisfaga el criterio general de normalidad de la muestra que tienen muchos de los test estadísticos aplicados posteriormente. Dado que existen muchos métodos de normalización posibles, cada indicador ha sido normalizado empleando aquel método que consigue una mayor reducción en la asimetría en de la distribución de valores. La tabla 5 que se incluye en el Anexo 2 indica el método de transformación estadística seleccionado en cada caso.
2. **Estandarización:** Dada la gran variedad de unidades de medida empleadas para expresar los valores de cada uno de los indicadores empleados en el análisis de vulnerabilidad, ha sido necesario realizar un ejercicio previo de estandarización de los mismos. La estandarización permite así que la posterior combinación y/o agregación de los indicadores sea estadísticamente robusta. Como en el caso de la transformación, también existen numerosos métodos de estandarización. En este trabajo se ha utilizado el método más difundido, que es el la unidad tipificada (z-score). Este método se basa en el número de desviaciones típicas en que un valor dado se sitúa por encima o debajo de la media de su población. La formulación es como sigue:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

donde  $x$  es un valor procedente de una población con media  $\mu$  y desviación típica  $\sigma$ .

3. **Re-escalado:** Por último, con el objetivo de eliminar los valores negativos de la distribución de datos y permitir una agregación más sencilla de los valores, todos los indicadores han sido re-escalados de tal forma que la observación con el valor mínimo tuviese valor 1 y aquella con valor máximo tuviese valor 2. La fórmula empleada para realizar el re-escalado de los datos ha sido la siguiente:

$$s = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} + 1$$

Este tratamiento de datos se ha aplicado de forma iterativa a cada indicador individual, antes de comenzar el procesamiento estadístico, y posteriormente a cada indicador agregado de exposición, sensibilidad, capacidad de respuesta/adaptación y vulnerabilidad/riesgo. De este modo, en total la secuencia descrita se ha aplicado cinco veces.

## A1.5. Análisis de consistencia interna

Este análisis pretende validar la consistencia interna de los valores de una muestra o población mediante el análisis de las correlaciones entre los distintos elementos que la componen. Cuando el objetivo es como en este caso la generación de indicadores agregados a partir de variables individuales, el análisis trata de comprobar en qué medida el conjunto de indicadores individuales son capaces de describir el constructo unidimensional que se persigue caracterizar agregando los distintos elementos (OECD, 2008).

En nuestro caso específico el análisis de consistencia interna valida implícitamente la estabilidad del modelo causal desarrollado anteriormente, de forma que los valores de los indicadores a los que se atribuye la carga explicativa de la sensibilidad o la capacidad de respuesta/adaptación varíen entre los distintos distritos de forma mutuamente coherente y estable.

El estadístico más empleado para realizar este tipo análisis es el alfa de Cronbach, calculado a partir de las correlaciones entre los pares de indicadores incluidos en el panel de datos. El estadístico cuantifica la consistencia del modelo en un rango entre cero y uno. Normalmente, se considera que un valor superior a 0,7 es aceptable como comprobación de la consistencia interna. La siguiente tabla muestra los resultados del estadístico para los indicadores de sensibilidad y capacidad adaptativa combinados en el presente estudio:

|   |      |
|---|------|
| Indicadores de sensibilidad                       | 0,87 |
| Indicadores de capacidad de respuesta/ adaptación | 0,75 |

Tabla 4 – Valores estadísticos para el análisis de la consistencia interna de los indicadores utilizados.

## A1.6. Asignación de pesos

Para la asignación de pesos se ha empleado una metodología basada en el Análisis de Componentes Principales (PCA) y el Análisis Factorial (FA). Se trata de métodos comúnmente empleados para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos que, aplicados en este contexto, permiten eliminar la redundancia en la información asociada a cada indicador. Mediante la asignación de pesos empleando esta técnica, aquellos indicadores que contienen información redundante son “penalizados” con pesos inferiores, mientras aquellos cuya carga explicativa individual es mayor reciben pesos superiores. Por lo tanto, los pesos definidos de este modo no deben ser interpretados en modo alguno como una medida de la importancia relativa de los distintos indicadores, sino como una forma de reducir la redundancia en la información incluida en el modelo.

El cómputo de los pesos empleando la técnica PCA/FA requiere en primer lugar el análisis de la estructura de correlación de la muestra, dado que en el caso que la correlación entre los indicadores sea débil es poco probable que compartan factores comunes. Ello, que ya ha quedado indirectamente acreditado con el precedente análisis de consistencia interna, ha quedado ratificado y descrito en un mayor nivel detalle mediante el PCA.

El segundo paso ha sido el de la extracción de un número de factores representativo los datos. Para ello se ha empleado el método de FA. Para cada cadena de impacto y dimensión analizada (sensibilidad y capacidad de respuesta/adaptación), se ha retenido un número de factores con valores *eigen* superiores a uno, cuya contribución individual a la explicación de la varianza global es superior al 10 %, y cuya contribución acumulativa a la explicación de la varianza global es superior al 60 %.

El tercer paso consiste en la rotación de los factores, que en este caso ha sido realizada mediante la técnica varimax. La rotación persigue minimizar el número de indicadores individuales que tienen cargas altas dentro del mismo factor.

El último paso consiste en la asignación de los pesos partiendo de la matriz de factores rotados. La técnica empleada permite asignar pesos a cada indicador teniendo en cuenta la influencia del mismo en el factor en que se engloba y el de este en el conjunto de datos. Para ello, primero se agrupan los indicadores individuales con las cargas mayores en un conjunto de indicadores compuestos intermedios, para después agregar estos últimos asignándoles un peso equivalente a la proporción de la varianza explicada en el panel de datos (OECD, 2008).

Una característica importante de este procedimiento es que la suma de los pesos para cada grupo de indicadores es siempre igual a uno. El Anexo 2 proporciona más información acerca de los pesos asignados a cada indicador mediante la aplicación de esta metodología.

Es importante subrayar que, a pesar de la asignación de pesos distintos a los indicadores de sensibilidad y capacidad adaptativa seleccionados para la caracterización de las cadenas de impacto, la contribución de los distintos componentes del modelo (exposición, sensibilidad y capacidad de respuesta/adaptación) al valor final del índice de vulnerabilidad permanece estable, tal y como se muestra en el siguiente gráfico:

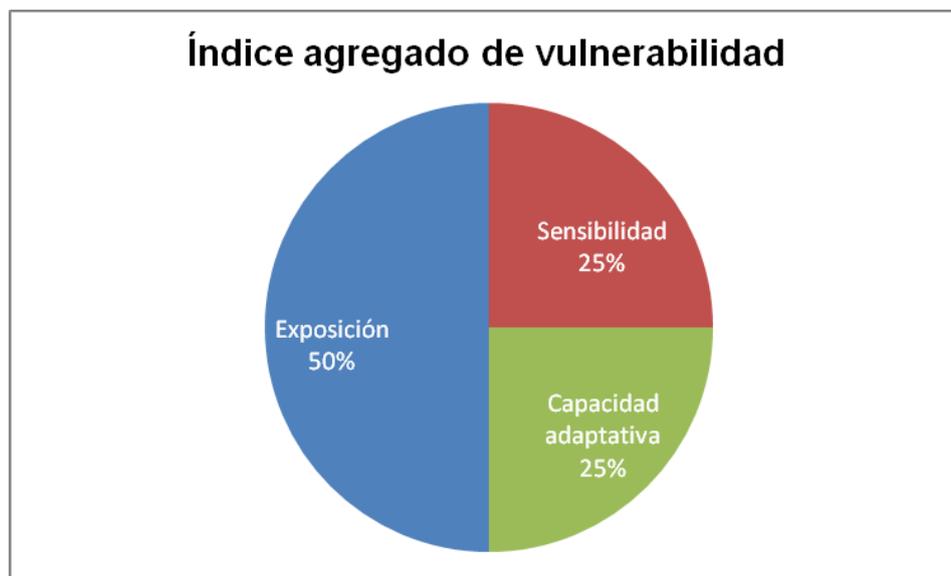


Gráfico 8 - Contribución de los distintos componentes al índice de vulnerabilidad.

## A1.7. Generación de los índices de vulnerabilidad

Una vez generados los pesos, el último paso ha sido la agregación de los distintos indicadores pesados en tres índices compuestos de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa. Para la agregación de estos índices se ha optado por una formulación geométrica (multiplicativa) en lugar de una aritmética (aditiva), ya que aquella resulta estadísticamente más estable (El-Zein & Tonmoy, 2015) y sufre menos el defecto de la compensabilidad completa del que adolece la agregación aditiva (OECD, 2008). La agregación se ha realizado pues generando un producto ponderado de los indicadores en forma de una “función de utilidad” (*utility function*), también conocida como “Índice de privación” (*deprivation index*), con la siguiente formulación:

$$I_{ch} = \prod_{i=1}^n X_{ij}^{w_j}$$

donde  $I_{ch}$  = índice compuesto del componente del riesgo  $c$  (exposición, sensibilidad o capacidad de respuesta) y la amenaza  $h$ ,  $X_{ij}$  = valor de la observación  $i$  para la variable  $j$ ,  $w_j$  = peso asignado a la variable  $j$ .

La aplicación de esta fórmula ha resultado en la generación de un índice agregado de vulnerabilidad específico para cada distrito de Madrid y cada una de las cadenas de impacto. En este sentido, es importante resaltar que, teniendo en cuenta que no existe una métrica objetiva para caracterizar la vulnerabilidad por medio de una unidad de medida estandarizada, todos los índices de vulnerabilidad –en este y otros estudios– se expresan como medidas relativas sensibles a los valores de entrada de los indicadores empleados, así como a los métodos de agregación de los mismos en unidades de análisis. Ello implica que estos índices no permiten realizar comparaciones entre distintas cadenas de impacto ni tampoco a través de ámbitos territoriales distintos.

Por lo tanto, los índices agregados de vulnerabilidad ante el cambio climático que se han obtenido en el marco de esta consultoría pueden ser empleados para ordenar los distritos en cuanto a su nivel de vulnerabilidad y evaluar cuánto más o menos vulnerable es cada distrito respecto al resto bajo de cada cadena de impacto. Sin embargo, los índices no permiten comparar los resultados entre varias cadenas de impacto ni con otros índices referidos a ámbitos territoriales distintos (regiones, ciudades e incluso países), aun cuando estos hubiesen sido generados aplicando la misma metodología.

## **Anexo 2. Indicadores utilizados**

Las tablas siguientes muestran los indicadores empleados para caracterizar los posibles impactos vinculados al cambio climático (exposición), así como la sensibilidad y la capacidad de respuesta y adaptación de los receptores de los mismos en cada distrito de la ciudad de Madrid.

Las tablas muestran también la procedencia de cada indicador, así como el método de transformación estadística empleado y el peso asignado a cada uno de ellos mediante la metodología estadística descrita en el Anexo 1.

## A2.1. Indicadores de exposición

| Cadena de impacto   | Indicador  | Código            | Fuente  | Método de transformación | Peso |
|---|--|-------------------|---|--------------------------|------|
| Impacto de olas de calor sobre la salud humana                          | <b>Media de temperatura nocturna</b> (23 h)  | MEAN_T_NOC_2013   | Elaboración propia sobre Información de proporcionada por el Departamento de Urbanismo    | Cuadrados                | 1    |
| Sequías y disponibilidad de agua y su impacto en la actividad económica | -  | -                 | -   | -                        | -    |
| Alteración / modificación de ecosistemas y pérdida de biodiversidad     | <b>Proporción de superficie con espacios verdes</b> (incluyendo espacios forestales) | PROP_ESP_VER_2013 | Elaboración propia sobre análisis GIS   | Logarítmico              | 1    |
| Inundaciones y gestión de agua de tormentas en el medio construido      | <b>Proporción de superficie distrital potencialmente expuesta a inundaciones</b>     | SUP_INUND_2015    | Elaboración propia sobre cartografía de zonas inundables del Ministerio de Medio Ambiente | -                        | 0,5  |
|   | <b>Altitud media de cada distrito</b>  | INV_ALT           | Elaboración propia sobre análisis GIS   | Logarítmico              | 0,5  |

## A2.2. Indicadores de sensibilidad

| Cadena de impacto                              | Indicador  | Código                | Fuente         | Método de transformación | Peso |
|--|--|-----------------------|----------------|--------------------------|------|
| Impacto de olas de calor sobre la salud humana | <b>Tasa estandarizada de mortalidad</b>  | MORT_EST_2009_2013    | Madrid Salud   | Raíz cúbica              | 0,04 |
|  | <b>Índice de envejecimiento</b> Personas de más de 70 años (Porcentaje)  | TASA_MAYOR70_2014     | Banco de Datos | -                        | 0,09 |
|  | <b>Niños.</b> Personas de menos de 4 años (Porcentaje)   | TASA_MENOR4_2014      | Banco de Datos | Logarítmico              | 0,07 |
|  | <b>Personas solas.</b> Proporción de hogares integrados por un solo miembro  | TASA_SOLOS_2014       | Banco de Datos | Logarítmico              | 0,17 |
|  | <b>Ancianos solos.</b> Porcentaje de personas con más de 70 años que viven solas   | TASA_MAS70_SOLOS_2014 | Banco de Datos | Cuadrados                | 0,09 |
|  | <b>Discapacidades:</b> Tasa de personas con algún grado de discapacidad motriz o psíquica o sensorial  | DISCAPACIDAD_2012     | Banco de Datos | Raíz cuadrada            | 0,06 |
|  | <b>Desempleo.</b> Estimador de Tasa de Desempleo Registrado (porcentaje)   | PARO_2013             | Banco de Datos | Raíz cuadrada            | 0,07 |
|  | <b>Pobreza.</b> Perceptores de prestación de la Renta Mínima de Inserción (RMI)  | TASA_RMI_2013         | Banco de Datos | Logarítmico              | 0,07 |
|  | <b>Emergencia social:</b> Media mensual de Llamadas telefónicas y Atenciones de Emergencias por Distrito desde la Central de SAMUR social (Tasa por 1000 habitantes) | LLAM_SAMUR_1000_2013  | Banco de Datos | Logarítmico              | 0,29 |
|  | <b>Infravivienda:</b> Porcentaje de "viviendas" con 20m2 o menos por habitante   | NDPs_20m2_2011        | Madrid Salud   | Raíz cuadrada            | 0,06 |

## ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MUNICIPIO DE MADRID

| Cadena de impacto   | Indicador   | Código            | Fuente   | Método de transformación | Peso |
|---|---|-------------------|--|--------------------------|------|
| Sequías y disponibilidad de agua y su impacto en la actividad económica | <b>Consumo total de agua por habitante</b> (litros/habitante/día)   | CONSUMOAGUA_2013  | Banco de Datos   | Raíz cuadrada            | 0,35 |
|   | <b>Densidad de piscinas.</b> Número de piscinas por hectárea  | DENS_PISCI_2015   | Elaboración propia sobre datos facilitados por el Área de Medio Ambiente del Ayto. de Madrid   | Logarítmico              | 0,04 |
|   | <b>Oferta hotelera.</b> Plazas hoteleras por 1000 habitantes  | PLAZAS_HOTEL_2014 | Banco de Datos   | Logarítmico              | 0,09 |
|   | <b>Equilibrio entre actividad y residencia</b>  | ACT_RESI_2013     | Departamento de Urbanismo  | Logarítmico              | 0,42 |
|   | <b>Intensidad económica.</b> Afiliados a la Seguridad Social que trabajan en cada Distrito sobre población total del Distrito | INTENS_ECON_2013  | Elaboración propia sobre datos procedentes del Banco de Datos  | Logarítmico              | 0,09 |
| Alteración / modificación de ecosistemas y pérdida de biodiversidad     | <b>Calidad de los ecosistemas.</b> Variedad de tipos de cobertura del suelo   | CAL_ECOS_2015     | Elaboración propia sobre datos <i>Corine Land Cover</i>  | Logarítmico              | 0,21 |
|   | <b>Superficie No Urbanizable Protegida</b>  | NOUR_PROT_2013    | Área de Medio Ambiente del Ayto. de Madrid   | Logarítmico              | 0,24 |
|   | <b>Superficie cubierta por Parques Históricos</b>   | PARQ_HIST_2013    | Área de Medio Ambiente del Ayto. de Madrid   | Logarítmico              | 0,55 |
| Inundaciones y gestión de agua de tormentas en el medio construido      | <b>Proporción de superficie de asentamiento informal potencialmente sujeta a inundaciones</b>                                 | INFORM_INUND_2015 | Elaboración propia mediante análisis GIS, sobre datos proporcionados por Madrid Salud y cartografía de zonas inundables del Ministerio de Medio Ambiente | Raíz cuadrada            | 0,22 |

## ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MUNICIPIO DE MADRID

| Cadena de impacto | Indicador  | Código                      | Fuente   | Método de transformación | Peso |
|-------------------|--|-----------------------------|--|--------------------------|------|
|                   | <b>Proporción de superficie construida potencialmente sujeta a inundaciones</b>  | SUP_CONS_INUN_2015          | Elaboración propia mediante análisis GIS, sobre cartografía de zonas inundables del Ministerio de Medio Ambiente | Raíz cuadrática          | 0,15 |
|                   | <b>Proporción de infraestructuras críticas localizadas en zonas inundables</b>   | INF_CRIT_INUND_2015         | Elaboración propia mediante análisis GIS, sobre cartografía de zonas inundables del Ministerio de Medio Ambiente | Logarítmico              | 0,15 |
|                   | <b>Garajes y sótanos inundables.</b><br>Porcentaje de viviendas que disponen de garaje por distrito  | VIVI_GARAJE_2011            | Censo de Edificios y Viviendas 2011  | Logarítmico              | 0,16 |
|                   | <b>Intervenciones cuerpo de bomberos por “daños por agua”.</b> Media de intervenciones anuales (Tasa por 1000 habitantes. Periodo 2000-2013).  | BOMB_AGU_X1000HAB_2000_2013 | Elaboración propia sobre datos procedentes del Banco de Datos  | Logarítmico              | 0,18 |
|                   | <b>Intervenciones cuerpo de bomberos por “daños por agua”.</b> Media de intervenciones anuales (Proporción de intervenciones por “daños por agua” sobre total actuaciones. Periodo 2000-2013). | BOMB_AGU_PROP_2000_2014     | Elaboración propia sobre datos procedentes del Banco de Datos  | Logarítmico              | 0,15 |

## A2.3. Indicadores de capacidad de respuesta y adaptación

| Cadena de impacto   | Indicador  | Código              | Fuente   | Método de transformación | Peso |
|---|--|---------------------|--|--------------------------|------|
| Impacto de olas de calor sobre la salud humana                          | <b>Renta disponible.</b> Renta Disponible Bruta per cápita (€)   | RENTA_2010          | Banco de Datos   | -                        | 0,14 |
|   | <b>Nivel educativo.</b> Proporción de población con 25 o más años con titulación de Licenciado Universitario, Arquitecto o Ingeniero | EST_SUP_2014        | Banco de Datos   | Logarítmico              | 0,14 |
|   | <b>Tasa de asociacionismo vecinal:</b> Asociaciones de vecinos por 10000 habitantes  | ASOC_VECIN_2013     | Banco de Datos   | Logarítmico              | 0,19 |
|   | <b>Dotación de zonas verdes</b> por habitante  | SUP_VER_CAP         | Banco de Datos   | Logarítmico              | 0,15 |
|   | <b>Factor Verde</b>  | FAC_VER_2013        | Departamento de Urbanismo  | Logarítmico              | 0,25 |
|   | <b>Infraestructuras sanitarias.</b> Centros de salud x 100.000 hab   | CEN_SALUD_2013      | Banco de Datos   | Raíz cuadrada            | 0,14 |
| Sequías y disponibilidad de agua y su impacto en la actividad económica | <b>Proporción consumo agua estimado doméstico</b> sobre asimilado industrial más comercial   | AGU_DOM_INDCOM_2014 | Área de Medio Ambiente   | Raíz cúbica              | 0,50 |
|   | <b>Índice de diversidad de actividades industriales</b> (Índice de Shannon)  | SHANON_IND_2010     | Elaboración propia sobre Banco de Datos  | -                        | 0,50 |
| Alteración / modificación de ecosistemas y pérdida de biodiversidad     | <b>Accesibilidad a parques de bomberos</b>   | ACCESS_INC_2015     | Elaboración propia mediante análisis GIS sobre datos procedentes del portal Nomecalles | Cuadrático               | 0,50 |
|   | <b>Accesibilidad a la red de distribución de la red de agua regenerada</b>   | RED_AGU_RECI_2011   | Área de Medio Ambiente del Ayto. de Madrid   | Raíz cuadrada            | 0,50 |

| Cadena de impacto  | Indicador                          | Código         | Fuente                                  | Método de transformación | Peso |
|--|------------------------------------|----------------|---|--------------------------|------|
| Inundaciones y gestión de agua de tormentas en el medio construido | Porcentaje de superficie permeable | PERMEABLE_2013 | Elaboración propia sobre Banco de datos | Logarítmico              | 1    |

Tabla 5 –Indicadores de exposición, sensibilidad y capacidad de respuesta y adaptación empleados. Se especifica además su fuente, el método de transformación estadística utilizado y el peso asignado a cada uno de ellos en el análisis.