

METODOLOGÍAS DE GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS URBANAS RESILIENTES

Ramón Egea, Técnico de planificación y obras, regea@emuasa.es

Simón Nevado, Director de operaciones, snevado@emuasa.es

Sergio Pascual, Responsable de planificación y obras, spascual@emuasa.es

Eva Mena, Responsable de I+D+i, emena@emuasa.es

Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia S.A, Plaza Circular 9, 30008 Murcia

RESUMEN

La gestión de las infraestructuras críticas supone un desafío creciente debido a los efectos de la presión demográfica (factores sociales), los impactos medioambientales y factores económicos, que reducen la resiliencia ante las amenazas potenciales sobrevenidas (factores estratégicos).

El desarrollo de modelos metodológicos de gestión de las infraestructuras hidráulicas urbanas resulta esencial para la gestión de las redes de abastecimiento de agua potable y de alcantarillado urbanos, en particular en regiones semiáridas como es el caso de la ciudad de Murcia, permitiendo hacer frente de manera sostenible a las amenazas específicas (A_k) más representativas, las hidrológicas (A_H) y las geológicas (A_G).

La metodología desarrollada desde el departamento de Planificación y Obras de la Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia S. A. (Emuasa) define, caracteriza, integra y estructura la información esencial de la infraestructura hidráulica mediante el análisis de la susceptibilidad (S) y de la resiliencia de amenaza específica (α_k) de los diferentes componentes, sistemas y subsistemas de la infraestructura hidráulica, definiendo y caracterizando los indicadores específicos (I) y las amenazas en base a análisis de microzonificación (A_{k0}) y los factores zonales (F_k), estableciendo diferentes grados de criticidad de la infraestructura a partir de un enfoque holístico, integrando tanto la caracterización física (S_f) como la operacional (S_o), de sus componentes, y evolucionando hacia un modelo sostenible de gestión.

La aplicación de esta metodología supone para los gestores una herramienta de toma de decisiones en tiempo real más objetiva, así como de planificación e información a los diferentes organismos competentes de la Administración Pública. Permite incrementar la confiabilidad (C_f) de la infraestructura hidráulica, ya sea en la operación ordinaria como en situaciones extraordinarias, manteniendo así la continuidad del servicio de alcantarillado y del abastecimiento de agua potable, asegurando la cantidad y la calidad del suministro de esta.

El riesgo específico inicial obtenido ($R_i = A_k \cdot (S/\alpha_k)$) mediante un análisis determinístico siguiendo la metodología desarrollada perfecciona el análisis probabilístico, resultando así una robusta herramienta de análisis y de desarrollo evolutivo del riesgo (IGR).

Palabras clave: Vulnerabilidad, resiliencia, sostenibilidad, holístico, infraestructura crítica.

INTRODUCCIÓN

La gestión de las infraestructuras críticas, sobre todo en entornos urbanos, supone un desafío creciente en el marco de incertidumbre actual, con grandes fluctuaciones climáticas, crecimiento poblacional (factores sociales), impactos medioambientales (factores ambientales) y económicos (factores económicos), que reducen la resiliencia ante las amenazas potenciales sobrevenidas (factores estratégicos).

El desarrollo de modelos metodológicos de gestión de las Infraestructuras Hidráulicas Urbanas (IHU) es esencial para hacer frente a las amenazas específicas (A_k) más representativas de la zona de análisis, en este caso, las hidrológicas (A_H) y las geológicas (A_G), de manera sostenible.

El desarrollo metodológico que se está realizando desde Emuasa se caracteriza por su replicabilidad en cualquier sistema de IHU. Se define una estructura relacional de indicadores representativos del sistema IHU, integrando la gestión física y la operativa de sus componentes esenciales, estructurando la información esencial de la infraestructura, mediante el análisis de la susceptibilidad (S) y de la resiliencia de amenaza específica (α_k) de los diferentes componentes, sistemas y subsistemas de la IHU, definiendo y caracterizando los indicadores específicos (I), y las amenazas en base a análisis de microzonificación (A_{k0}) y los factores zonales (F_k), estableciendo diferentes grados de criticidad a partir de un enfoque holístico, integrando la caracterización física (S_f) y la operacional (S_o) de sus componentes, evolucionando hacia un modelo sostenible de gestión.

Constituye, para los gestores, una “herramienta” de toma de decisiones en tiempo real más objetiva y, para la Administración Pública, de planificación e información. Permite incrementar la confiabilidad (C_f) de la IH, ya sea en la operación ordinaria como en situaciones extraordinarias, manteniendo la continuidad del saneamiento y del abastecimiento, tanto en cantidad como en calidad. Proporciona un incremento de la resiliencia (Δ_α), mitigando los daños (D), y aminorando el riesgo en la IHU, a través de una gestión eficiente en un marco de incertidumbre y de incremento de la frecuencia ($f=1/T$), siendo T el periodo de retorno, y de la intensidad (I) de eventos, hidrológicos (H , inundaciones y crecidas) y geológicos (Remociones en masa, RM ; sismos, SM ; episodios volcánicos, V) de carácter extremo.

El riesgo específico inicial queda definido mediante la expresión ($R_i=A_k*V_k=A_k*(S/\alpha_k)$), a partir de un análisis determinístico preliminar siguiendo la metodología desarrollada, y que perfecciona el análisis probabilístico, por lo que resulta una metodología híbrida de análisis configurando así una robusta herramienta de análisis y de desarrollo evolutivo del riesgo (IGR). Mediante un Sistema de Información Geográfica (G.I.S.) se generan escenarios potenciales de riesgo utilizando este modelo híbrido de análisis, introduciendo un enfoque integral (determinístico y probabilístico), permitiendo así anticiparse a los efectos anómalos generados por las amenazas analizadas e incrementando la resiliencia de la IHU.

La implantación de la metodología (análisis y gestión de riesgos) desarrollada resulta esencial, para la gestión de las IHU de abastecimiento de agua potable y de alcantarillado urbanos, en particular en regiones semiáridas, como es el caso de la ciudad de Murcia. (Egea R., 2018).

OBJETIVOS

La correcta caracterización física y operacional de la IHU precisa de un análisis integral vinculado (enfoque holístico) de los componentes esenciales que definen a la misma. Es a partir de esta caracterización del sistema cuando se analizan y caracterizan a su vez las amenazas hidrológicas y geológicas representativas de la zona de análisis, en este caso la ciudad de Murcia, así como la evolución de las mismas y los factores determinantes en su potencial de afectación. Este marco de definición permitiría desarrollar acciones de planificación, planes de gestión y de mitigación de daños, así como desarrollar estrategias de gestión que garanticen la continuidad del servicio y una gestión preventiva de la IUH. A continuación, se resumen los objetivos principales propuestos:

- Propuesta metodológica para el análisis del riesgo hidrológico y geológico de la IHU
- Definición y análisis de parámetros y variables definitorias de los componentes de la IHU.
- Caracterización zonal de amenazas hidrológicas y geológicas y factores de amenaza vinculados a éstas.
- Definición y caracterización de indicadores de susceptibilidad física y operacional e indicadores de resiliencia de la IHU.
- Caracterización de riesgos específicos.

- Obtención de Índices de daño específico de la IHU.
- Definición y construcción de indicadores generales o de sostenibilidad del sistema.
- Definición e implantación de la metodología de seguimiento de la gestión de riesgos.

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGOS

La mayoría de las investigaciones existentes sobre vulnerabilidad de infraestructuras tuvieron su origen en el análisis de la amenaza sísmica, incorporando posteriormente otros tipos de amenaza (metodologías multirriesgo), por lo que existe una extensa bibliografía que incide en este aspecto.

La estrategia está basada en modelos de análisis de vulnerabilidad que confieren un marco de actuación que se limita al análisis de la vulnerabilidad a partir de la medición de la capacidad estructural de los componentes del sistema y los efectos producidos, integrando de manera parcial la capacidad de gestión de esta. Este análisis se utiliza, en general, para evaluar de manera individual los componentes del sistema de manera independiente, sin necesidad de estudiar su interacción con los otros.

La caracterización de la IHU por medio de indicadores permitiría, de manera simple y sencilla, mediante la definición de rangos (escala numérica) y la designación de valores, obtener los siguientes hitos:

- Definición física y operacional de cada componente de la IHU y su análisis de susceptibilidad potencial.
- Caracterización de la capacidad de respuesta (resiliencia) de cada componente de la IHU frente a las amenazas hidrológicas y geológicas caracterizadas localmente (microzonificación de amenazas).
- Realizar un análisis multicriterio y multidisciplinar del comportamiento de la IHU y las amenazas analizadas.
- Planificación de actuaciones e implantación de medidas de mitigación (resiliencia) ante potenciales eventos de las amenazas analizadas (hidrológica y geológica).
- Recopilación o inventario de la información necesaria, además de la estructuración de esta.
- Integración de componentes y procesos de gestión de la IHU.
- Integración de procesos (enfoque holístico) para la adaptación de la IHU a la dinámica de las amenazas.
- Seguimiento (evolución temporal) del comportamiento de la IHU, por componente básico, y del Sistema IHU en su conjunto.
- Disminuir las incertidumbres, al mejorar la definición de cada componente de la IHU, y el grado de afectación, o de interacción de estos, así como su influencia en la operación integral de la misma.

La ponderación de los valores realizada, aunque inicialmente obedece a criterios subjetivos (opiniones de expertos), se justifica de manera objetiva mediante el empleo de del procedimiento de análisis jerárquico (P.A.J.) de Saaty Thomas L., (1980).

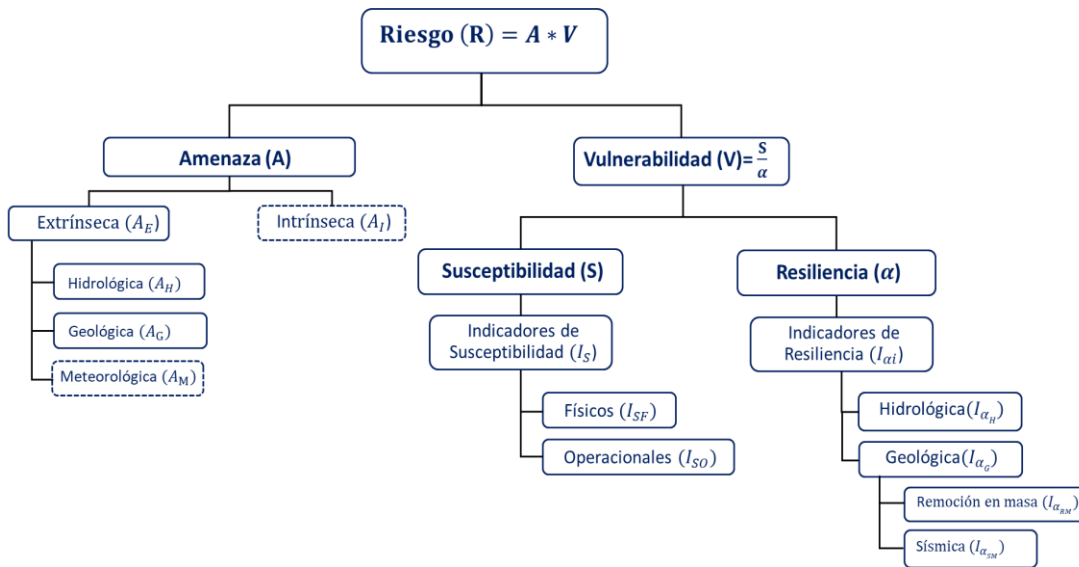


Figura 1. Esquema conceptual de la metodología (Fuente: elaboración propia).

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el esquema conceptual de la metodología general, el riesgo (R) se calcula mediante la multiplicación de sus dos componentes: la amenaza extrínseca (A_k) y la vulnerabilidad intrínseca (V) (1).

La A se compone de tres tipologías: amenaza hidrológica (A_H), geológica (A_G) y meteorológica (A_M). La vulnerabilidad intrínseca (V) se calcula mediante la susceptibilidad (S) y la resiliencia (α) (4). Para determinar la susceptibilidad se definen indicadores, tanto físicos como operacionales, que permiten gestionar y evaluar el estado de los distintos componentes del sistema de IHU (5). Finalmente, para determinar la resiliencia de cada tipología de infraestructura frente a potenciales amenazas específicas, se construyen indicadores de resiliencia que permiten cuantificar el efecto de esta en la IHU

(6).

En la ecuación (1) se presenta el riesgo específico para cada una de las k amenazas e i tipologías de infraestructura. R se cuantifica en unidades de daño, dependiendo de la naturaleza del riesgo específico que se busca determinar, A_k en unidades del parámetro crítico de la amenaza específica [Uc_k] y finalmente, V, en unidades de daño por unidad del parámetro crítico de la amenaza específica [$Daño \cdot Uc_k^{-1}$].

$$R_{ki} [Daño] = A_k [Uc_k] \cdot V_{ki} [Daño \cdot Uc_k^{-1}] \quad (1)$$

En la ecuación (2) se presenta la amenaza (A_k) como el producto del parámetro incidente crítico de amenaza o peligro (Pp_k) y la multiplicatoria de los $G(k)$ factores de amenaza o peligro (Fp_{kg}), los cuales pueden acentuar o atenuar la incidencia del parámetro crítico.

$$A_k [Uc_k] = Pp_k [Uc_k] \cdot \prod_{g=1}^{G(k)} Fp_{kg} \quad (2)$$

Siendo,

$$Pp_k [Uc_k] = A_0 [Uc_k]$$

La ecuación (3a) presenta los factores de amenaza (Fp_{kg}), calculados en base a la ponderación de éstos y la ponderación de A_k y ,a su vez, el producto de los $G(k)$ factores de

amenaza o peligro (Fp_{kg}) según la ecuación (3b), los cuales pueden acentuar o atenuar la incidencia del parámetro crítico. Finalmente, A_k queda representada de la manera expresada por la ecuación (3c). Siendo $W_{Fp_{kgmáx}}$ el peso del factor de amenaza específica, y el parámetro crítico Pp_k , es lo que define al valor de la amenaza umbral o inicial.

$$Fp_{kg} = 1 + \left(W_{Fp_{kg}} \cdot \left(\sum W_{Fp_{kgmáx}} - 3 \right) \cdot W_{Fp_{kgmáx}} \right) \quad (3a)$$

$$\prod_{g=1}^{G(k)} Fp_{kg} = Fp_{kg_1} \cdot Fp_{kg_2} \cdot Fp_{kg_3} \quad (3b)$$

$$A_k[Uc_k] = A_0[Uc_k] \cdot \prod_{g=1}^{G(k)} Fp_{kg} \quad (3c)$$

En la ecuación (4) se presenta la vulnerabilidad (V_{ki}) para cada una de las k amenazas e i tipologías de infraestructura, calculada como cociente de la susceptibilidad intrínseca (S_i) de la infraestructura y la resiliencia específica del componente i a la amenaza k (α_{ki}).

$$V_{ki} [Daño \cdot Uc_k^{-1}] = \frac{S_i []}{\alpha_{ki} [Uc_k \cdot Daño^{-1}]} \quad (4)$$

En la ecuación (5) se presenta el detalle del cálculo de la susceptibilidad intrínseca de cada tipología de IHU, identificando dos principales componentes: la susceptibilidad física (Sf_i), determinada por los F_i indicadores de susceptibilidad física y la susceptibilidad operacional (So_i), determinada por los O_i indicadores de susceptibilidad operacional de cada componente de la IHU.

$$S_i [] = Sf_i [] + So_i [] = \sum_{n=1}^{F_i} W_{sf_{in}} \cdot Isf_{in} + \sum_{j=1}^{O_i} W_{so_{ij}} \cdot Iso_{ij} \quad (5)$$

En la ecuación

(6) se presenta el detalle del cálculo de la resiliencia de cada componente i frente a la amenaza k , esta se define mediante los índices de resiliencia ($I\alpha_{kil}$).

$$\alpha_{ki} [Uc_k \cdot Daño^{-1}] = \sum_{l=1}^{L_{ki}} W_{\alpha_{kil}} \cdot I\alpha_{kil} [Uc_k \cdot Daño^{-1}] \quad (6)$$

Obtenidos los indicadores de susceptibilidad y de resiliencia específicos de cada amenaza, se homogenizan sus valores, verificando así la expresión (7).

$$\sum_1^i I_{Si} + \sum_1^i I_{\alpha_{ki}} = 1 \quad (7)$$

Los valores de fluctuación de los indicadores de resiliencia se encuentran entre un valor mínimo de 0.10 y un valor máximo de 1.0. Respecto a los indicadores de susceptibilidad, éstos operan entre un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 1. Todo ello con el fin de evitar indeterminaciones de orden matemático, o de índole práctica, ya que valores inferiores a esas estimaciones propuestas no se producen.

La vulnerabilidad de la IUH, obtenida según la ecuación (4), se normalizaría a valores comprendidos entre 0 y 1,0.

En la Tabla 1 se recogen los valores de vulnerabilidad normalizados y los valores de los indicadores y de resiliencia obtenidos.

Tabla 1. Matriz normalizada de vulnerabilidad, en función de los indicadores de susceptibilidad y de resiliencia normalizada (Fuente: elaboración propia).

		Susceptibilidad																				
		0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
Resiliencia	1.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10
	0.95	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11
	0.90	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11
	0.85	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12
	0.80	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13
	0.75	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.13
	0.70	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14
	0.65	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15
	0.60	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17
	0.55	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15	0.16	0.17	0.18
	0.50	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20
	0.45	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22
	0.40	0.00	0.01	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23	0.24	0.25
	0.35	0.00	0.01	0.03	0.04	0.06	0.07	0.09	0.10	0.11	0.13	0.14	0.16	0.17	0.19	0.20	0.21	0.23	0.24	0.26	0.27	0.29
	0.30	0.00	0.02	0.03	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.18	0.20	0.22	0.23	0.25	0.27	0.28	0.30	0.32	0.33
	0.25	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40
	0.20	0.00	0.03	0.05	0.08	0.10	0.13	0.15	0.18	0.20	0.23	0.25	0.28	0.30	0.33	0.35	0.38	0.40	0.43	0.45	0.48	0.50
	0.15	0.00	0.03	0.07	0.10	0.13	0.17	0.20	0.23	0.27	0.30	0.33	0.37	0.40	0.43	0.47	0.50	0.53	0.57	0.60	0.63	0.67
	0.10	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.05	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	
0.01	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	

Con lo que se obtendría la vulnerabilidad homogenizada de cada componente de la infraestructura V_{ki}^h respecto de la amenaza específica, es decir $V_{ki}^h = V_{ki} [Daño \cdot Uc_k^{-1}]$ (4).

En las ecuaciones (8) y (9) se presenta, a modo de ejemplo, el detalle del cálculo del riesgo específico del componente i frente a la amenaza k.

$$R_{ki} [Daño] = A_k [Uc_k] \cdot \frac{S_i []}{\alpha_{ki} [Uc_k \cdot Daño^{-1}]} \quad (8)$$

$$R_{ki} [Daño] = Pp_k [Uc_k] \cdot \left(\prod_{g=1}^{G(k)} Fp_{kg} \right) \cdot \left(\frac{\left(\sum_{d=1}^{F_i} Ws_{fid} \cdot Is_{fid} + \sum_{j=1}^{O_i} Ws_{oj} \cdot Iso_{ij} \right) []}{\left(\sum_{l=1}^{L_{ki}} W\alpha_{kil} \cdot I\alpha_{kil} \right) [Uc_k \cdot Daño^{-1}]} \right) \quad (9)$$

En cuanto al seguimiento de los indicadores o variables en el tiempo, se introduce un parámetro $[Y_X]_{[N(X)*N(X)]}^t$, el cual permite conocer la variación del valor de un indicador X. Este parámetro es una matriz diagonal de dimensiones N(X)*N(X), donde N(X) es el número de columnas de la variable X (10).

$$[X]_{[1*N(X)]}^t = [X]_{[1*N(X)]}^0 \cdot [Y_X]_{[N(X)*N(X)]}^t \quad (10)$$

En la ecuación (11) se presenta la construcción de cada componente de la diagonal de $[Y_X]_{[N(X)*N(X)]}^t$, considerando que es una variación en el tiempo. Se introduce un resto (ϵ), positivo y cercano a 0^+ , de modo que si $[X](1, n)^0 = 0$, la ecuación no se indetermina.

$$[Y_X](n, n)^t = \frac{[X](1, n)^t}{[X](1, n)^0 + \epsilon}, \quad \epsilon > 0 \wedge \epsilon \ll \quad (11)$$

La metodología de análisis de riesgos propuesta podría generar escenarios potenciales de afectación de la IHU, basados en los riesgos específicos obtenidos a partir de las amenazas específicas y la vulnerabilidad de los diferentes componentes de la IHU, definida por los indicadores de susceptibilidad y los indicadores de resiliencia.

A continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra un esquema general del modelo metodológico propuesto, replicable a cualquier sistema, con las salvedades indicadas, y el desarrollo aplicativo de la metodología propuesta (Figuras 3-6).

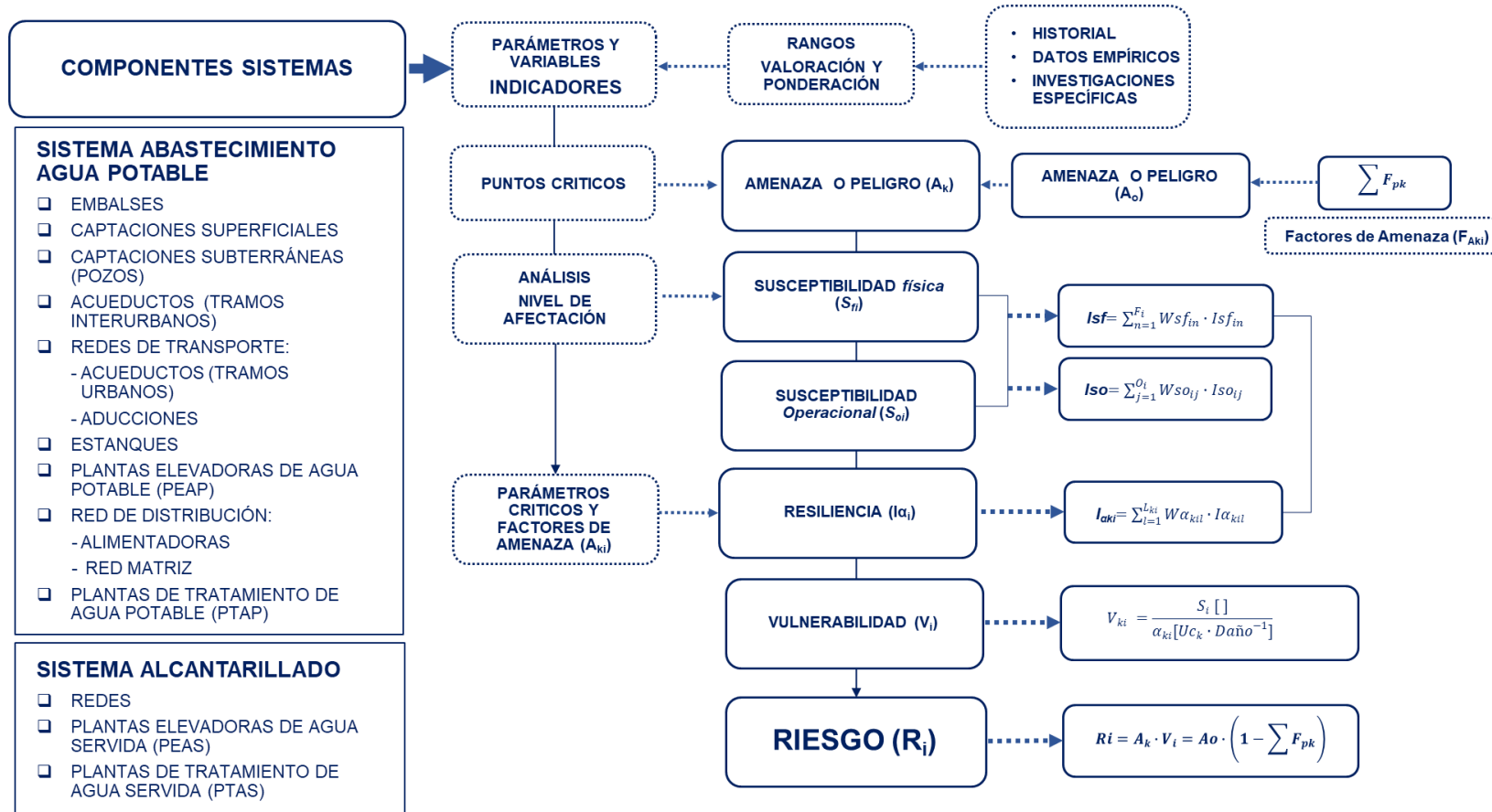


Figura 2. Esquema de aplicación metodológica (Fuente: elaboración propia).

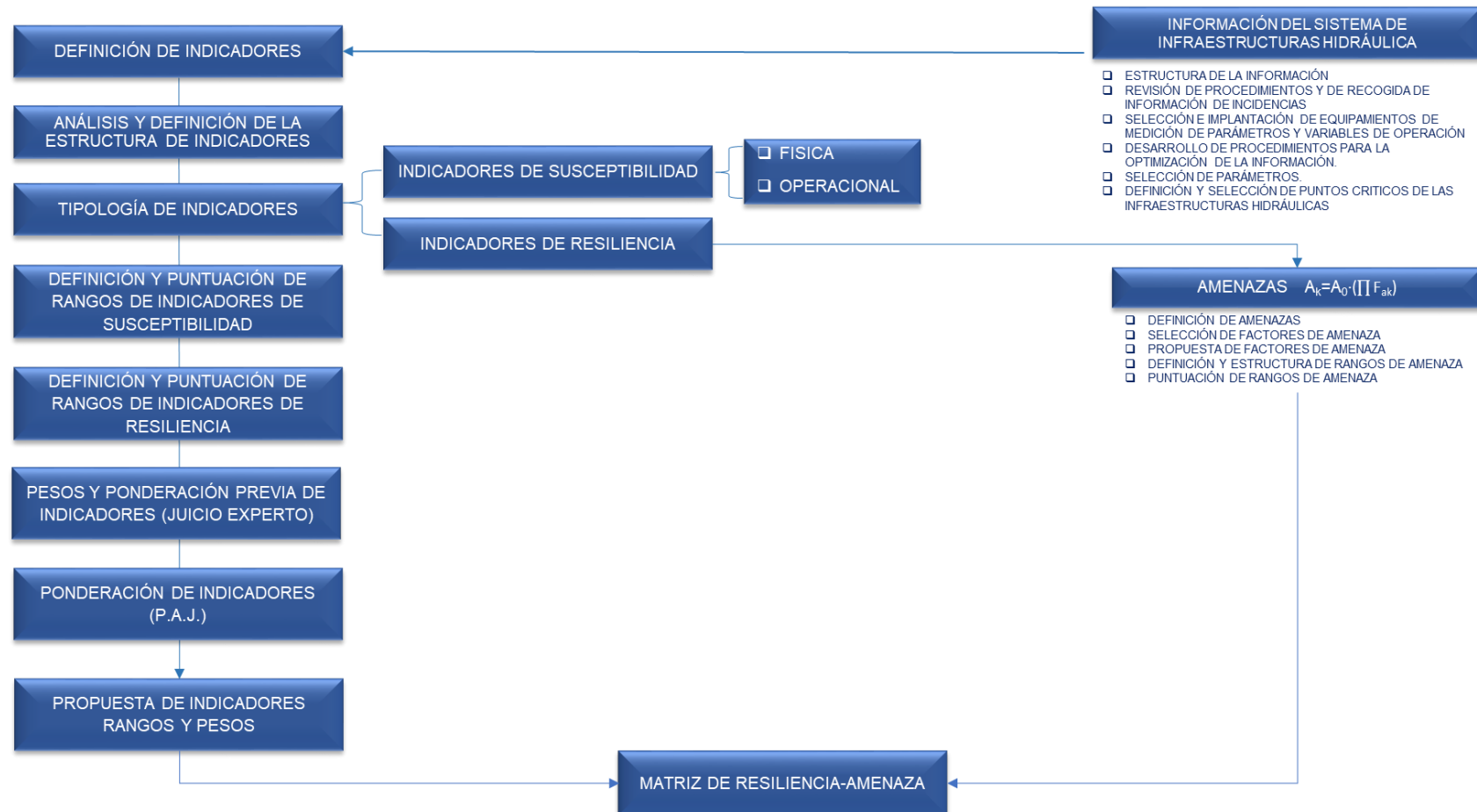


Figura 3. Desarrollo y aplicación de la Metodología Fase I (Fuente: elaboración propia).

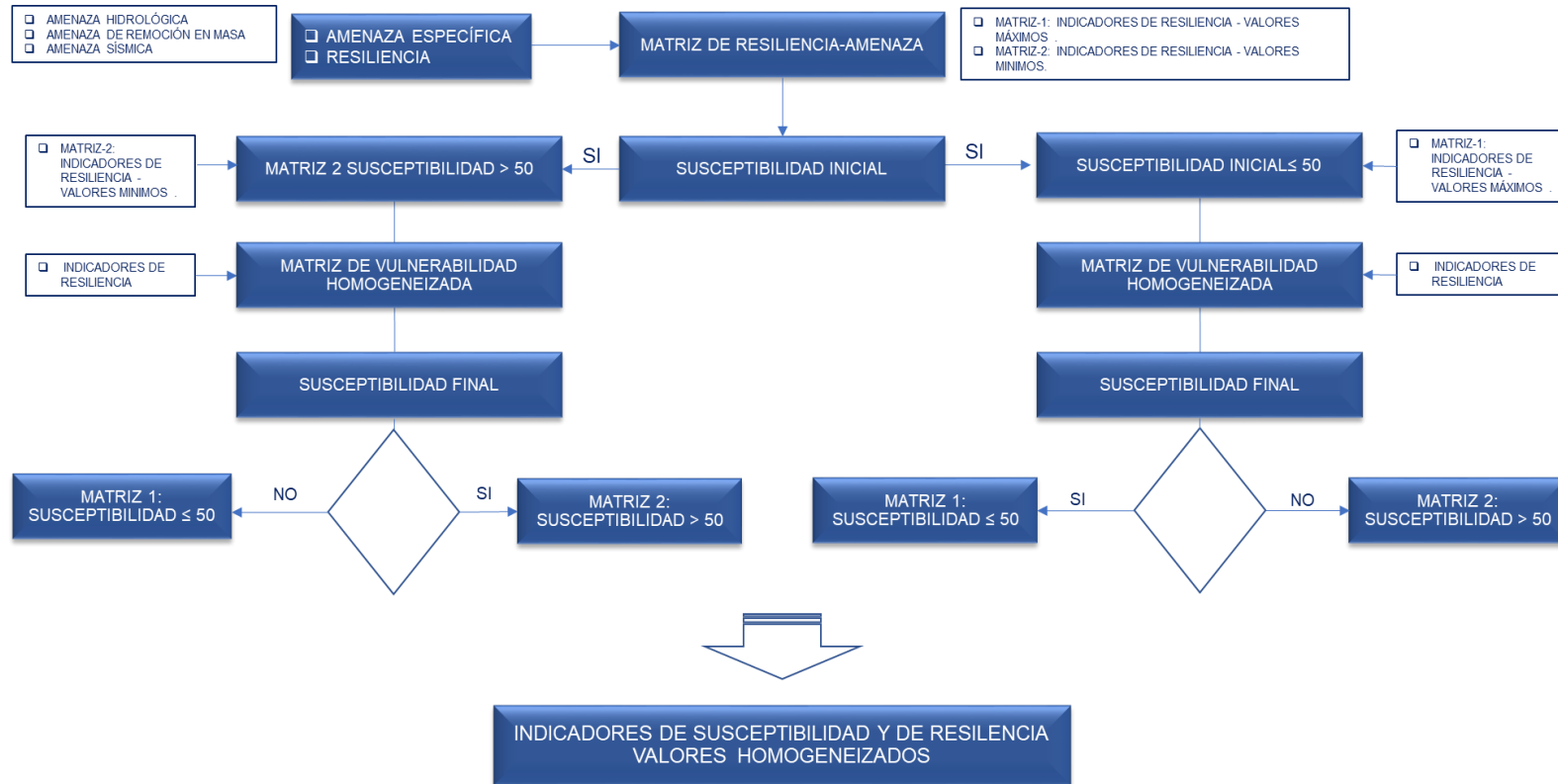


Figura 4. Desarrollo y aplicación de la Metodología Fase II (Fuente: elaboración propia).

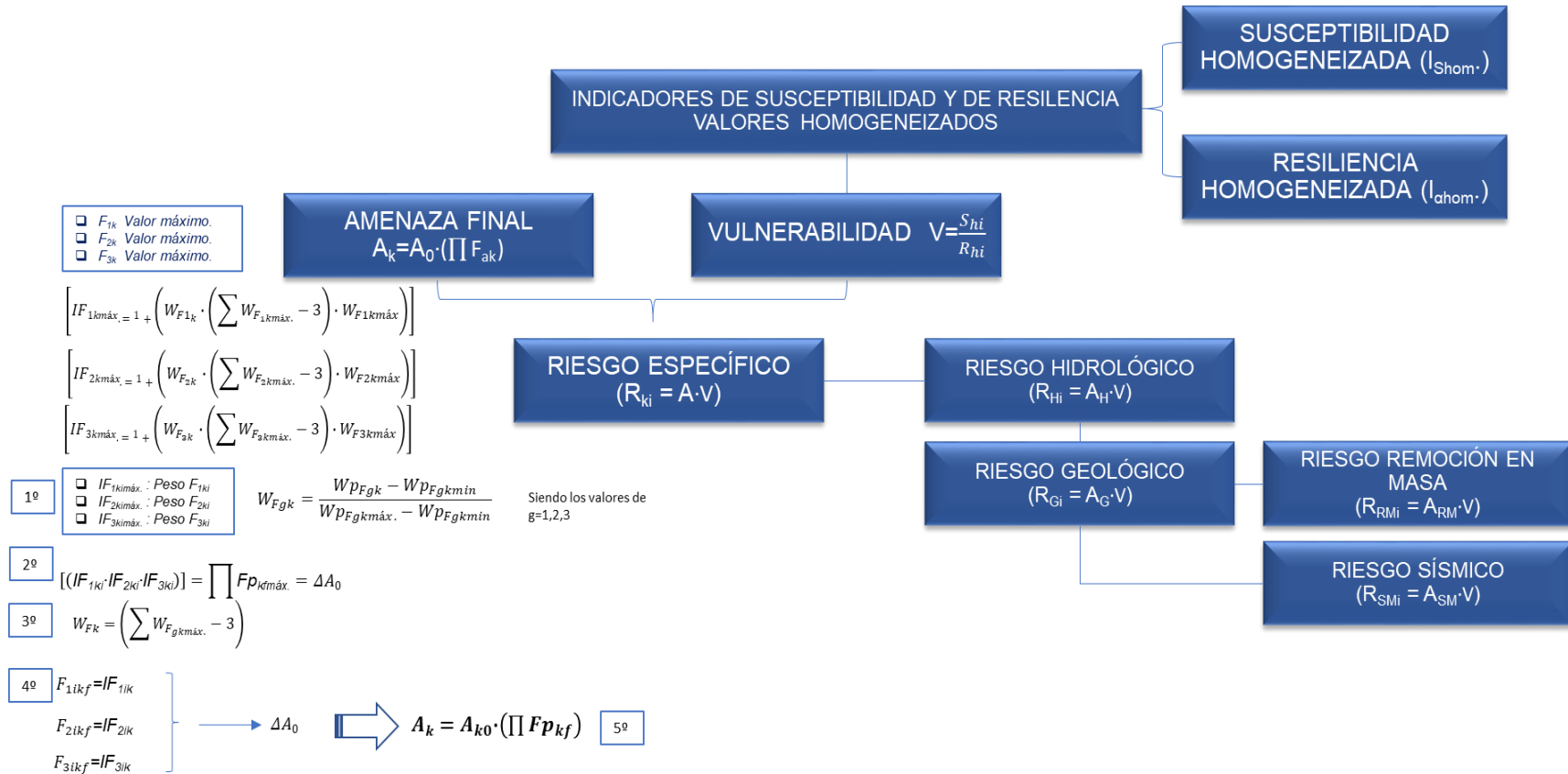


Figura 5. Desarrollo y aplicación de la Metodología Fase III (Fuente: elaboración propia).

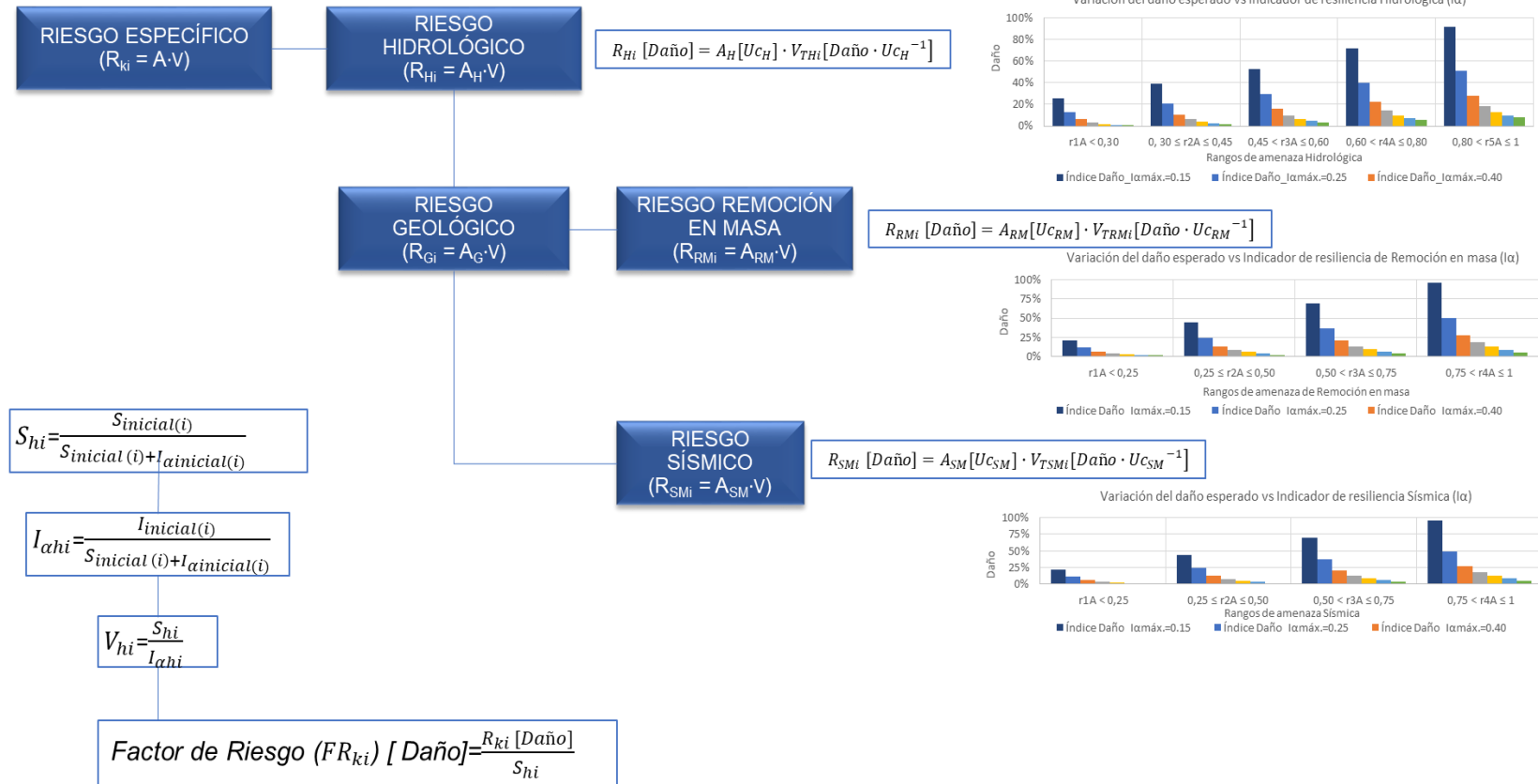


Figura 6. Desarrollo y aplicación de la metodología Fase IV (Fuente: elaboración propia).

Como caso de aplicación de la metodología propuesta, se ha seleccionado la red de transporte como elemento crítico del abastecimiento (Figura 7).



Figura 7. Red de abastecimiento de la ciudad de Murcia.

Se ha caracterizado la infraestructura mediante las variables y parámetros enumerados a continuación, y que están incluidos en la propuesta metodológica de gestión y análisis de riesgos desarrollada en este documento. Esta información permitirá construir los indicadores de susceptibilidad.

- Longitud tramo de red (km).
- Tipo de material.
- Antigüedad media de la tubería por tramos (años).
- Rango de diámetros (mm.) y tipología o naturaleza del material.
- Presión de servicio (mínima y máxima) por tipología de material y diámetro (kg/cm²).
- Tipología de derivaciones (con unión flexible), o tipología de materiales unión.
- Nº de reparaciones año con afectación parcial o total al suministro según tipología de material.
- Tipología de mantenimiento correctivo o preventivo (clasificación I a VI) relacionado con ANR.
- Nº cámaras o arquetas de inspección según tipología de material de la tubería.
- Nº válvulas de corte o de seccionamiento por tramos.
- Nº válvulas reguladoras de presión según tipología de material y diámetro de la tubería.
- Nº de dispositivos de “escucha” según tipología de material y diámetro tubería.
- Nº interceptaciones con infraestructuras lineales críticas.
- Nivel de criticidad según tramos (caudal, presión de servicio, población abastecida, alternativa de suministro, depósitos o estanques intermedios, etc.)
- Alternativas de suministro por tramos (desviaciones).
- Población abastecida por tramos (hab./km red).
- Nº contadores o medidores de caudal por tramos (Nº medidores/km red).
- Nº depósitos o estanques intermedios abastecidos y capacidad unitaria de los mismos, por tramos de red (m³).

La selección de indicadores de susceptibilidad (P.A.J.) permite definir y construir los indicadores de resiliencia específica, incorporando las amenazas naturales más representativas de la zona, hidrológica, sísmica y de remociones en masa, y estos, la vulnerabilidad específica de la IHU, que permitirá obtener el índice de riesgo específico (% de daño).

De los indicadores de susceptibilidad descritos anteriormente se han seleccionado aquellos que se consideran más representativos de la red de abastecimiento (Tabla 2 y Tabla 3).

Tabla 2. Indicadores de susceptibilidad físicos (I_{Sfi}).

Denominación	Indicador	Peso Indicador Sf	Valor umbral mínimo	Valor umbral máximo	Descripción	PAJ
I_{SfiRT1}	Antigüedad (años)/Naturaleza del material	56%	0,17	1.00	Se le asigna un valor para cada tipo de material y su antigüedad respectiva.	19.75%
I_{SfiRT2}	N° de derivaciones con unión flexible/N° cámaras de inspección	44%	0,00	0.67	Se refiere al número de conexiones con unión flexible (absorción de movimientos) existentes en la longitud del tramo de red de transporte, y por otra parte las cámaras de inspección permiten verificar posibles incidencias y acciones de alternativas. Así mismo, definen puntos críticos de transición debido al diferente grado de rigidez de ambos elementos (derivación y cámara de inspección).	29.42%
		100%	0,08	0.83		

Tabla 3. Indicadores de susceptibilidad operacional (I_{Soi}).

Denominación	Indicador	Peso Indicador Sf	Valor umbral mínimo	Valor umbral máximo	Descripción	PAJ
I_{SoiRT1}	N° reparaciones /Longitud total de red de transporte (km)	56%	0,10	0.90	Tasa anual de reparaciones por km de red de transporte, con corte parcial o total del tramo afectado	27.18%
I_{SoiRT2}	Grado de Mantenimiento [C-P]	44%	0,20	0.83	El mantenimiento de la instalación durante su operación ordinaria, clasificando el mismo en correctivo y preventivo.	23.65%
		100%	0,15	0.87		

Posteriormente, se obtienen los valores de los indicadores (Tabla 4 y Tabla 5), según los rangos propuestos y los valores de las variables y parámetros incorporados en dichos indicadores.

Tabla 4. Indicadores de susceptibilidad física y operacional.

Indicadores de Susceptibilidad Física				
Variables y/o parámetro	Valor variable o parámetro	Indicador	Rango	Valor Indicador
Antigüedad de la instalación (años):	0.90	0.30	r3	0.30
Material o tipología constructiva:	3.00			
Nº de derivaciones con unión flexible:	150.00	0.60	r3	0.60
Nº de cámaras de inspección:	250.00			
Indicadores de Susceptibilidad Operacional				
Variables y/o parámetro	Valor variable o parámetro	Indicador	Rango	Valor Indicador
Nº reparaciones:	85	0.362	r4	0.30
Longitud total de red de transporte (km):	235.00			
Grado de mantenimiento (C-P):	0.5	0.50	r6	0.50

Indicadores de Susceptibilidad física (I_{sf})				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
I_{sfRT1}	$r_3=0.30$	0.30	0.20	0.06
I_{sfRT2}	$r_3=0.60$	0.60	0.29	0.18
Total				0.24
Indicadores de Susceptibilidad operacional (I_{so})				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
I_{soRT1}	$r_6=0.095$	0.40	0.27	0.11
I_{soRT2}	Grado IV	0.40	0.24	0.09
Total				0.20

Tabla 5. Indicadores de resiliencia.

Resiliencia hidrológica ($I_{\alpha H}$)				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
$I_{\alpha HRT1}$	$r_3=0.13$	0.30	0.35	0.11
$I_{\alpha HRT2}$	$r_4=0.40$	0.45	0.40	0.18
$I_{\alpha HRT3}$	$r_8=0.80$	0.35	0.35	0.12
Total				0.41
Resiliencia de Remoción en masa ($I_{\alpha RM}$)				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
$I_{\alpha RMRT1}$	$r_4=0.40$	0.75	0.40	0.30
$I_{\alpha RMRT2}$	$r_6=0.60$	0.55	0.20	0.11
$I_{\alpha RMRT3}$	$r_9=0.85$	0.25	0.40	0.10
Total				0.51

Resiliencia Sísmica (I_{aSM})				
Indicador	Rango (r)	Puntuación (P)	Peso (W)	Resultado (PxW)
I_{aSMRT1}	r6=0.55	0.55	0.30	0.17
I_{aSMRT2}	r8=0.75	0.35	0.35	0.12
I_{aSMRT3}	r5=0.45	0.35	0.35	0.12
Total				0.41

En relación con las amenazas analizadas y los factores específicos, se obtiene los resultados incluidos en Tabla 6 :

Tabla 6. Análisis de las amenazas.

Amenaza hidrológica (AH)	0.49
Amenaza hidrológica umbral (A_{H0})	0.45
Factores de Amenaza hidrológica (F_{pH})	1.08
Nivel freático (F)	1.034
Permeabilidad del terreno (k)	1.036
Coef. de escorrentía (Ce)	1.009
Amenaza de Remoción en masa (A_{RM})	0.21
Amenaza de Remoción en masa umbral (A_{RM0})	0.20
Factores de Amenaza de Remoción en masa (F_{pRM})	1.07
Velocidad de deslizamiento (Vd)	1.02
Intensidad de Precipitación (I_{24})	1.03
Pendiente (I)	1.02
Amenaza Sísmica (A_{SM})	0.43
Amenaza Sísmica umbral (A_{SM0})	0.40
Factores de Amenaza Sísmica (F_{pSM})	1.08
Resistencia del terreno	1.04
Potencial licuefacción de los suelos	1.00
Variabilidad del perfil estratigráfico	1.04

Finalmente se obtiene el riesgo según la amenaza específica (Tabla 7), a partir de los indicadores finales de susceptibilidad, de resiliencia y de amenaza.

Tabla 7. Riesgos específicos.

Riesgo específico, $R=A_k*(S/\alpha)$	A_k	S	Resiliencia normalizada (α)	Susceptibilidad homogeneizada (Sh)	Resiliencia homogeneizada (αh)
Hidrológico (R_H)	0.49	0.44	0.29	0.60	0.40
Remoción en masa (R_{RM})	0.21	0.44	0.33	0.57	0.43
Sísmico (R_{SM})	0.43	0.44	0.36	0.55	0.45

Resiliencia homogeneizada (αh)	Vulnerabilidad (V)	Riesgo específico (R_k)	Factor de riesgo específico unitario (FRk). [Daño/ U_{ck}]
0.40	0.15	0.07	0.12
0.43	0.13	0.03	0.05
0.45	0.12	0.05	0.10

Es decir, la red arterial de abastecimiento de agua en zonas urbanas tendría unos índices de riesgo del 7%, 3% y 5% (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), según las amenazas hidrológicas, remoción en masa y sísmica, respectivamente, considerando una susceptibilidad del 44% y una resiliencia media del 43%.

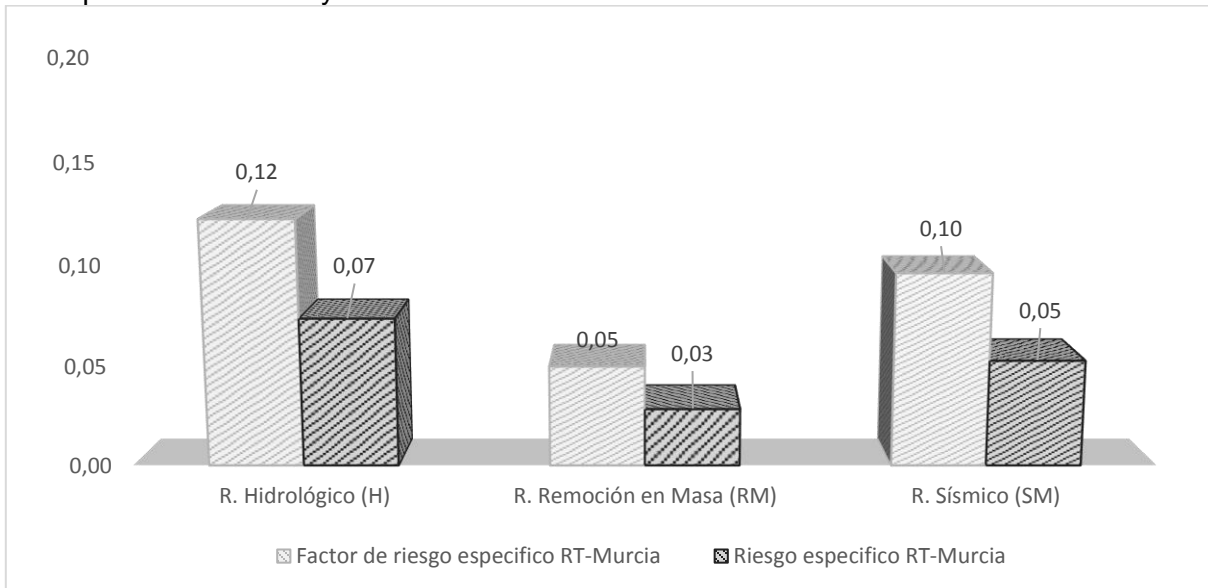


Figura 8. Análisis de riesgos específicos de la red de abastecimiento de la ciudad de Murcia.

A partir de los riesgos obtenidos y de acuerdo con lo descrito por Hwang et al. (2002), se obtienen los estados de daño (Figura 9).

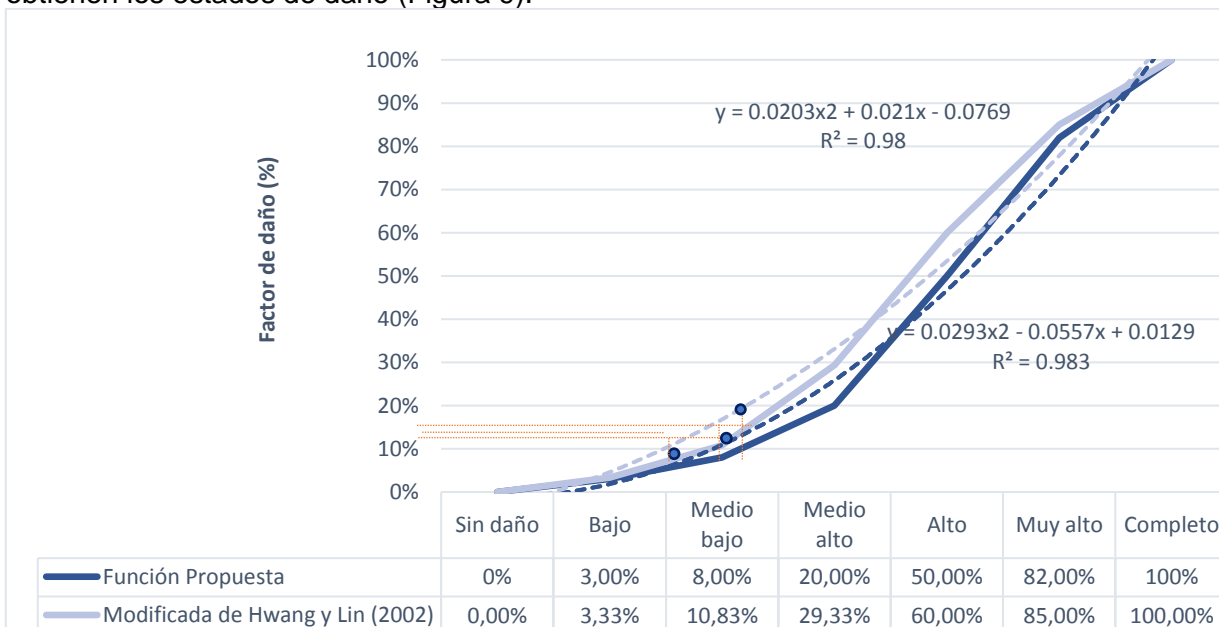


Figura 9. Estados de daño de la red de abastecimiento de Murcia.

Para la red de abastecimiento se ha considerado un grado de criticidad que garantice una vida útil (n) de 100 años. En la Figura 10 se puede apreciar la evolución de la probabilidad de excedencia de daño o Riesgo específico (R_{50}) y el periodo de retorno de la red de abastecimiento.

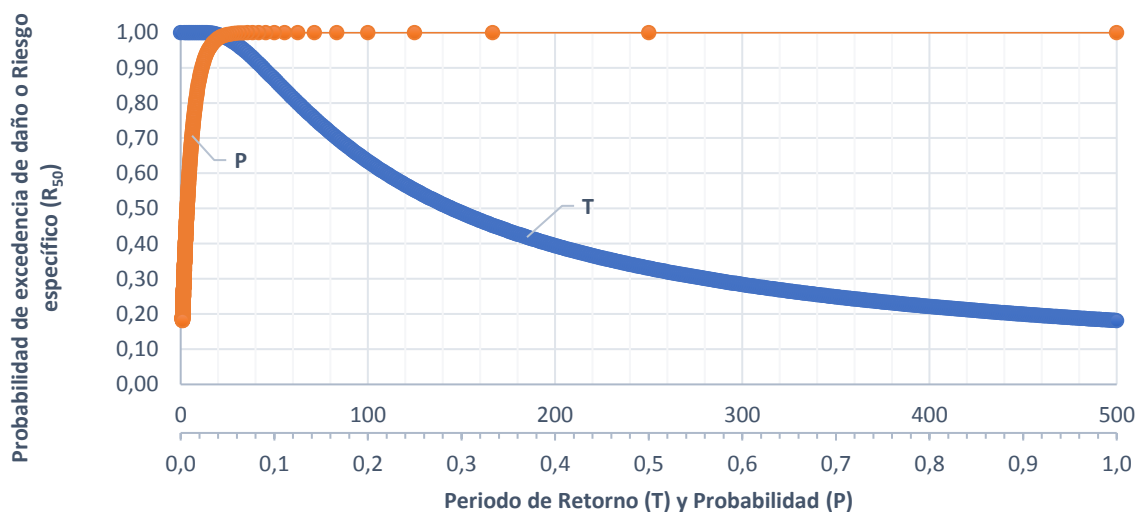


Figura 10. Evolución de la probabilidad (P) y periodo de retorno (T) para $n=100$ años.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el riesgo específico (R_H , R_{RM} y R_{SM}) incrementado según la criticidad de la infraestructura hidráulica de la red de abastecimiento para $n=100$ años.

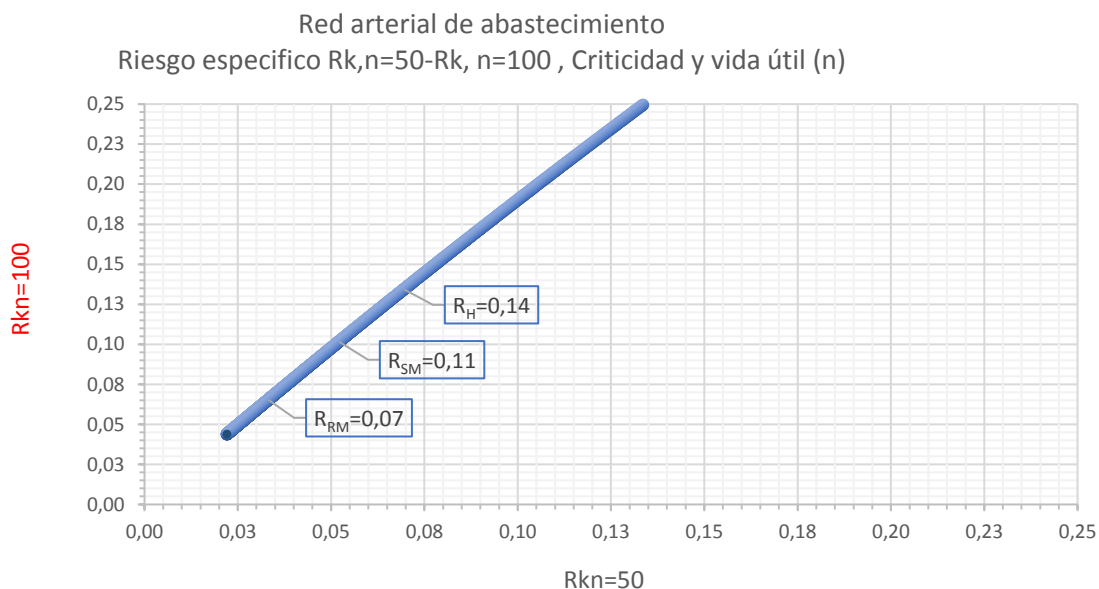


Figura 11. Riesgos específicos y criticidad para $n=50$ y 100 años.

RUMBO 20.30.

26
NOV

29
NOV

CONAMA 2018
CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

CONCLUSIONES

La metodología de riesgos hidrológicos y geológicos debe entenderse con un enfoque holístico, equilibrado en su aplicación, y capaz de adaptarse de manera sostenible, a un entorno dinámico (climatológico y tecnológico). Por ello, la caracterización que se ha realizado de las amenazas permite su integración equilibrada y dinámica en la definición de los indicadores específicos de susceptibilidad y de resiliencia.

Mediante este estudio se ha definido una metodología robusta, con capacidad de replicabilidad a cualquier sistema de IHU que permite una gestión dinámica, adaptable y evolutiva.

La caracterización de las amenazas hidrológicas (inundación y crecidas) y las amenazas geológicas (remoción en masa, sísmica, y volcánica), vinculadas a la susceptibilidad de la IHU mediante la definición de los factores de amenaza representativos de la zona de análisis, y la definición de indicadores de susceptibilidad (físicos y operacionales) y de resiliencia específica, integra de manera coherente y representativa la Infraestructura hidráulica con los efectos específicos que cada tipología de amenaza produciría, y con ello quedaría demostrada la total integración de cada uno de los componentes del riesgo, lo que representa un avance respecto a la propuesta por otros autores (Cardona, 2001; Barbat, 2003; Carreño, 2006).

Se han identificado también los índices de daño por componente de la IHU, integrando además la criticidad de los componentes de la infraestructura, según la tipología de gestión del sistema, obteniendo las funciones de distribución que definen la probabilidad de daño en relación con la vulnerabilidad obtenida. Este planteamiento permitiría integrar la información representativa del sistema de IHU en una plataforma G.I.S., estableciendo escenarios de riesgo potencial, y desarrollar la resiliencia

REFERENCIAS

- Barbat A.H. & Pujades L. (2004). *Evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a la ciudad de Barcelona*. Barcelona (España).
- Barbat, A. H., & Cardona, O. D. (2003). *Vulnerability and disaster risk indices from engineering perspective and holistic approach to consider hard and soft variables at urban level*.
- Cardona O.D. (2001). *Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España: Tesis Doctoral.
- Cardona O.D. (2004). *The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: A necessary review and criticism for effective risk management*. In: *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*. London (UK).
- Cardona, O. (2006). "A System of Indicators for Disaster Risk Management in the Americas" in *Measuring Vulnerability to Hazards of Natural Origin: Towards Disaster Resilient Societies*. Tokyo, (Japón): J. Birkmann, United Nations University Press.
- Cardona, O., Hurtado, E. J., Duque, G., Moreno, A., Chardon, A., & Velásquez, S. y. (2004). *Dimensionamiento relativo del riesgo y de la gestión: Metodología utilizando indicadores a nivel nacional*. Programa BID/IDEA de Indicadores para la Gestión de Riesgos, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. <http://idea.unalmz.edu.co>. Manizales (Colombia).
- Carreño M.L. Cardona O.D. Barbat A.H. (2006). "Urban seismic risk evaluation: a holistic approach", *Journal of Natural Hazards*. Dordrecht (Países Bajos): Springer.
- Carreño, M. O. (2005). *Sistema de Indicadores para la Evaluación de Riesgos*. Monografía CIMNE IS-52, Technical University of Catalonia. Barcelona (Spain).
- Carreño, M. O. (2007b). A disaster risk management performance index. *Journal of Natural Hazards*, 41(1), 1-20.
- Carreño, M.-L., Cardona, O. D., Marulanda, M. C., Barbat, A. H. (2006). *Evaluación del riesgo sísmico urbano: un enfoque holístico*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Egea R. et al., (2017a). Influence Of Hydrogeological And Geotechnical Parameters On The Seismic Behavior Of Potable Water Infrastructures.

Egea R. et al., (2017b). Mitigation Of Damage Caused To Drinking Water And Sewage Pipes During Seismic And Hydrological Episodes. Alicante: WITpress.

Egea R.&Trapote A., 2. (2017). Natural Risks And Vulnerability Management In Urban Water Supply Systems. Alicante.

Egea R., (2018). Investigación sobre modelos de gestión de infraestructuras hidráulicas urbanas resilientes en relación con los riesgos hidrológicos y geológicos. Universidad de Alicante (España) y Universidad de Chile, Santiago (Chile). Tesis doctoral.

Hwang H. and Lin, Y. (2002). "Seismic Loss Assesment of Memphis City School Buildings" Proceedings of The Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston.

Saaty Thomas L. (1980). The Analytic Hierarchy Pocess. Ed. McGrawHill.