

Herramientas Integradas de Adaptación al Clima para Mejorar de la resiliencia de infraestructuras. Proyecto CLARITY

Jose Cubillo⁽¹⁾, Laura Parra⁽²⁾

(1) Licenciado en Fisca, ACCIONA Ingeniería.

(5) Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos, CEDEX.

Autor de contacto: jcubillo@acciona.es

1. Introducción. Proyecto, necesidad y demostradores.

Es claro que debido al cambio climático, las variables climáticas futuras experimentarán valores más extremos: así por ejemplo, cabe esperar que aumente el número de olas de calor así como la frecuencia e intensidad de las lluvias torrenciales, lo que podría ocasionar grandes inundaciones. Es por ello que en el marco del proyecto europeo CLARITY, financiado por la Comisión Europea, se plantea el Desarrollo de un **Sistema Integrado de Información sobre Servicios Climáticos (CSIS)** basados en la nube, para la evaluación de la resistencia y la protección contra el cambio climático de grandes infraestructuras.

Más concretamente, el sistema CSIS desarrollado estará orientado a administradores y planificadores de infraestructuras de transporte, con las siguientes funcionalidades: definición de la vulnerabilidad asociada a infraestructuras viales frente al cambio climático, evaluación de la exposición a las distintas variables climáticas (actual y futura) a nivel europeo, evaluación del impacto esperado a diferentes escalas temporales, evaluación de riesgos en un contexto de enfoque multi-amenaza, identificación y evaluación de las opciones de adaptación, desarrollo de planes de acción de adaptación, maximización de la reutilización y adaptación de datos, tecnologías y servicios existentes.

El servicio climático desarrollado está siendo implantado en una infraestructura piloto, Autovía A-2 que conecta Madrid y Barcelona en un tramo con sección de 4 carriles, dos por sentido y 77 km de longitud entre el pk. 62 y el pk.135. Para ello, en el marco del piloto español se han desarrollado índices climáticos que describan el posible impacto del cambio climático sobre las infraestructuras viales en diferentes escalas temporales.

2. Desarrollo Sistema CSIS

Para resolver las necesidades que se plantean, se ha considerado de gran utilidad desarrollar servicios climáticos. Los servicios climáticos son herramientas tecnológicas que permiten al usuario (gestor de la carretera, en este caso) acceder a la información climática que necesita, de manera sencilla. Es decir, partiendo de la base de que es fundamental incorporar la información climática en el proceso de toma de decisiones -ya que va a permitir que la decisión que se tome esté mejor fundamentada- es preciso asumir también que no todos los actores involucrados en ese proceso van a ser expertos climáticos.

De esta manera, el desarrollo de herramientas, plataformas, etc que permitan tener acceso a los datos del clima, presentes y futuros, de manera sencilla y adaptada a las necesidades del usuario específico, permitirán dar un salto cualitativo en la gestión de los activos. Se trata pues de un proceso de “*customización*” de la información climática.

El proceso que hay detrás del desarrollo e implementación de este tipo de herramientas no es, sin embargo, sencillo. Se tiene por un lado la complejidad técnica (bases de datos, modelos climáticos, software, etc.); pero, por otro lado, hay que identificar las necesidades de los usuarios para que el producto que se desarrolle sea realmente útil. Por ello, se han puesto en marcha, a nivel de la UE, proyectos como CLARITY, en el que se está trabajando en el desarrollo de un servicio de información climática: CSIS (“*Climate Services Information System*”).

En el marco de CLARITY los trabajos han comenzado por identificar las necesidades de los usuarios, para lo que se han llevado a cabo talleres y seminarios con actores relevantes en el campo de las infraestructuras del transporte. Adicionalmente, la participación dentro del proyecto de socios implicados directamente en el mundo de las carreteras -ACCIONA y CEDEX- ha permitido tener una visión de primera mano de algunas de las cuestiones más relevantes que conviene tener en cuenta a la hora de estudiar los impactos más relevantes en este tipo de infraestructuras, así como las fases y flujos de trabajo en los que se deben incorporar las consideraciones climáticas. Todo este proceso se ha plasmado en lo que se han llamado “*User stories*” que pretenden ser, documentos de guía para el desarrollo de la estructura y *software* del servicio climático. Esta continua interacción entre usuarios, programadores y expertos en clima es lo que se ha venido a denominar proceso de co-creación.

Una vez que se ha perfilado la estructura general del servicio climático y se han creado los repositorios con los datos e índices climáticos identificados como más relevantes (tal y como se explica en el apartado siguiente) se ha iniciado el proceso de implementación de la herramienta propiamente dicho. Para ello, ya se han diseñado los primeros modelos (mock ups), a partir de los cuales se completará la estructura y utilidades finales de la herramienta CSIS. Todo este proceso se esquematiza en la Fig. 1, en la que se aprecian los flujos de trabajo dentro del proyecto, divididos en distintos grupos de trabajo (WP, por sus siglas en inglés, *work packages*).

Se ha de tener en cuenta que la arquitectura de este sistema se ha diseñado según dos bloques diferenciados:

- ✓ **Servicios climáticos IT:** son servicios parcialmente gratuitos, listos para usar y que requieren conocimientos técnicos o científicos mínimos. Estos servicios permitirán disponer de estudios de viabilidad previos para realizar después, si se considera conveniente, efectuar estudios de detalle o más avanzados.

- ✓ **Servicios climáticos expertos:** son servicios de pago, específicos para el estudio. Habitualmente, requerirán la obtención de datos o variables concretos para el caso que se está analizando. Requerirán por tanto la intervención de expertos que, apoyados en el CSIS, efectuarán un estudio particularizado de la necesidad presentada por el usuario.

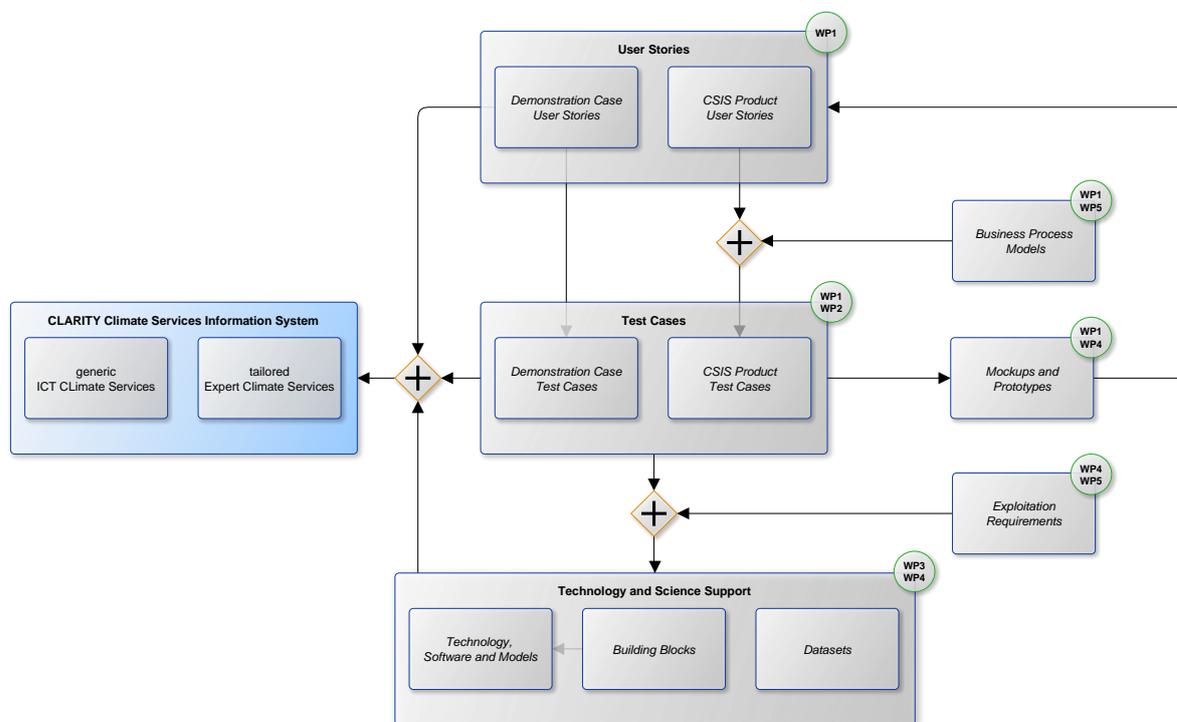


FIG. 1.- ESTRUCTURA PARA EL DESARROLLO DEL CSIS.

3. Índices climáticos y modelos empleados.

Tal y como se ha indicado, es fundamental efectuar un análisis profundo para identificar los índices climáticos relevantes para el caso de estudio carretera y posibles afecciones y vulnerabilidades frente a cambio climático. Existen ya distintos proyectos en los cuales se recogen, de forma genérica, distintas variables de interés para evaluar la vulnerabilidad frente al clima de las infraestructuras viarias. Partiendo por ello de esa información previa (RIMAROCC y ROADAPT) así como de la experiencia obtenida en trabajos concretos de estudio de la vulnerabilidad de las carreteras, a nivel de red (CEDEX, 2013 y CEDEX 2018) se ha propuesto una matriz cruzando los elementos que se proponen estudiar con las variables significativas, desde el punto de vista de su posible afección.

En la Tabla 1 se muestran las amenazas a efectos del estudio de los firmes de carretera y en la Tabla 2 las amenazas referidas a otros elementos de la carretera.

TABLA 1.- AMENAZAS CLIMÁTICAS (FIRMES DE CARRETERA).

Variable climática de interés		Índice climático	Elemento	Fase
Temperatura del aire	Temperaturas máximas	Percentil 95 Tmax verano astronómico	Diseño de mezclas	Proyecto/ Rehabilitación
	Oscilación térmica	ΔT dentro de 1 día	Diseño de mezclas	Proyecto/ Rehabilitación
	Ciclos hielo-deshielo	Días de helada	Diseño de mezclas; Previsión tratamientos preventivos	Proyecto/ Rehabilitación/ Explotación
Precipitación	Máxima (intensidad y frecuencia)	P24	Diseño drenaje	Proyecto/ Rehabilitación
	Régimen pluviométrico	P media anual	Diseño mezclas	Proyecto Rehabilitación
	Nieve	Pendiente de determinar	Tratamientos preventivos	Explotación
Precipitación +Temperatura	Formación de hielo	Pendiente de determinar	Tratamientos preventivos	Explotación

TABLA 2.- AMENAZAS CLIMÁTICAS (OTROS ELEMENTOS DE LA CARRETERA).

Variable climática de interés		Índice climático	Elemento	Fase
Precipitación	Máxima (intensidad y frecuencia)	P24	Inestabilidad de laderas	Proyecto/ Rehabilitación
	Precipitación acumulada	P 30 días	Deslizamiento de laderas	Proyecto Rehabilitación
Precipitación +Temperatura	Sequía	Pendiente de determinar	Tratamientos preventivos	Explotación
	Riesgo de incendios	FWI	Márgenes de la carretera	Explotación
Viento	Rachas de viento	Velocidad y dirección (95%)	Diseño carretera (pantallas, carteles, señales)	Proyecto/ Explotación

Una vez determinado el índice climático más representativo -por su posible impacto en el elemento de la carretera que se analiza- hay que concretar de qué manera se va a calcular. Aquí entran en juego los expertos en clima, ya que es preciso determinar qué modelos climáticos aportan información sobre ese índice.

4. Demostrador español. Diseño sistema de carretera y vulnerabilidades.

El proyecto CLARITY contempla la implantación del sistema CSIS desarrollado en 3 zonas urbanas (Nápoles, Estocolmo y Nápoles) y en una infraestructura de transporte (España). El tramo 2 de la citada Autovía A2, de dos carriles por sentido y 73 km de longitud, está comprendida entre la radial R2, en la provincia de Guadalajara (p.k.62+000), y Alcolea del Pinar, en el límite provincial con Soria (p.k.139+500). El tramo bajo estudio en el presente proyecto posee una altitud comprendida entre los 754 y 1.134 metros, situado el punto más elevado en el p.k. 136+000, en el que se alcanzan los 1.216 metros.

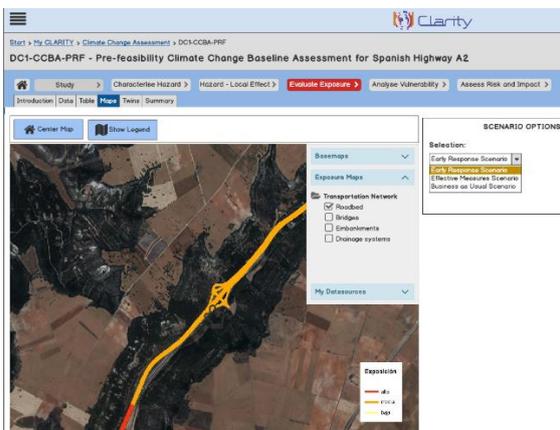


FIG. 2.- HERRAMIENTA CLARITY VULNERABILIDAD FRENTE A CAMBIO CLIMÁTICO



FIG. 3.- TRAMO A-2 ESTUDIADO FRENTE A CAMBIO CLIMÁTICO

- **Vulnerabilidad:** La caracterización de la vulnerabilidad del piloto español se ha realizado a partir de una tipología preestablecida de impactos. En la Figura 4, se relacionan los impactos considerados. Todos ellos son impactos que pueden ser, a priori, potencialmente relevantes por su posible incidencia sobre las condiciones de circulación y/o por la entidad de los daños ocasionados a una infraestructura de transporte.

Deslizamiento de laderas y caída de materiales y erosión en taludes como consecuencia de lluvias intensas
Erosión de taludes en terraplén junto a cauces como consecuencia de avenidas extraordinarias
Insuficiencia de capacidad de las obras de drenaje por lluvias intensas
Erosión de estribos, socavación de pilas y obras de contención, e impactos por arrastre de materiales en obras de fábrica por avenidas extraordinarias
Aparición de roderas en el pavimento como consecuencia de temperaturas elevadas
Insuficiencia de capacidad de desagüe de la superficie de la calzada como consecuencia de lluvias intensas
Afectación a las condiciones de vialidad por incendios en el margen de la vía
Afectación a las condiciones de vialidad por nieve

FIG. 4.- RELACIÓN PREESTABLECIDA DE IMPACTOS EN CARRETERAS POR RAZÓN DE EVENTOS CLIMÁTICOS¹

¹ "Secciones de la red estatal de infraestructuras de transporte terrestre potencialmente más expuestas por razón de la variabilidad y cambio climáticos". CEDEX. Junio 2018

- **Ejemplo posible afección vulnerabilidad. Sistema de drenaje.**

Durante el proyecto CLARITY se ha llevado a cabo un estudio de afección y vulnerabilidad del sistema de drenaje de la infraestructura frente a lluvias intensas, entre otros factores analizados.

El drenaje longitudinal original del tramo de autovía A-2 objeto de estudio, está constituido por cunetas con desagüe en régimen libre. La distancia de desagüe de éstas nunca es superior a 500/1000 m según tipo de cuentas, distancia originalmente suficientemente conservadora. La evacuación de las mismas, según contemplado en proyecto original de la carretera, año 2008, se resuelve bien vertiendo directamente al terreno o mediante arqueta de hormigón con arenoso, donde es posible, o bien por medio de obras transversales de drenaje longitudinal. El drenaje longitudinal se proyectó para un periodo de retorno de 25 años.

Por ejemplo, para el dimensionamiento de las cunetas, se incluyó una comprobación hidráulica de su funcionamiento, teniendo presente sus capacidades de transporte y los respectivos caudales a desaguar;

- Capacidad de transporte de la cuneta

$$Q = V \cdot S \quad (\text{ecuación de continuidad})$$

$$i = \frac{n^2 \cdot v^2}{R_H^3}$$

$$R_H = \frac{S}{P_m}$$

siendo:

- Q : capacidad de transporte (m³/seg.)
- v : velocidad de transporte (m/seg.)
- S : sección de la cuneta (m²)
- n : coeficiente de Manning, toma el valor: 0,015 para cunetas revestidas
0,030 para cunetas no revestidas
- R_H : radio hidráulico de la sección (m)
- P_m : perímetro mojado (m)
- i : pendiente longitudinal de la cuneta (tanto por uno)

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3.6} \cdot k$$

en donde,

- C : Coeficiente medio de escorrentía de la cuenca o superficie drenada.
- A : Área de la cuenca o superficie drenada, en km².
- I : Intensidad media de precipitación correspondiente al periodo de retorno considerado y a un intervalo igual al tiempo de concentración en mm/h.
- k : Coeficiente que tiene en cuenta la falta de uniformidad en la distribución temporal del aguacero.

La expresión utilizada para determinar el valor de k es función del tiempo de concentración, T_c, de la cuenca (fórmula de J.R. Témez):

FIG. 5.- CAUDAL A DESAGUAR POR CUNETAS

Del mismo modo, el cálculo del caudal de escorrentía a desaguar por la cuneta, se realizó con el método 2 de la instrucción 5.2.I.C "Drejeane superficial, según mostrado en figura 6

$$C = \frac{(P_d - P_0)(P_d + 23P_0)}{(P_d + 11P_0)^2}$$

siendo:

- P_d : precipitación diaria para el periodo de retorno considerado (mm)
- P₀ : umbral de escorrentía (mm).

Dicho coeficiente toma el valor 1 en calzada y cuneta, tomando para el terreno el correspondiente según su precipitación.

La intensidad media de lluvia se calcula por medio de la fórmula:

$$\frac{I}{I_d} = \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{28^{I_1 - I_d - 1}} \cdot 0.4$$

FIG. 6.- COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

TRAMO	P _d máx (mm)					
	2	5	10	25	100	500
P.K. 62-P.K.138,8	36,84	48,68	57,52	69,28	88,0	113,24

La P_d para el periodo de retorno de 25 años resulta 69,28 mm.

Por tanto:

$$I_d = P_d/24 = 2,88667 \text{ mm/h.}$$

$$I = 25,022 \cdot 2,88667 = 72,230 \text{ m/h}$$

FIG. 7.- PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS

En lo que se refiere a las precipitaciones máximas diarias calculadas en proyecto original, se obtuvieron para los diferentes periodos de retorno los valores referenciados en la figura 7.

5. Conclusiones

Se ha descrito la metodología de investigación en el proyecto CLARITY para evaluación de resiliencia de infraestructuras (urbanas y de transporte) frente a cambio climático.

Se han descrito los principales índices climáticos a evaluar y su escala temporal de evaluación y las fuentes meteorológicas sobre las que se desarrollarán los índices.

Por tanto, en función de los resultados de los índices climáticos analizados y las vulnerabilidades identificadas para la infraestructura de transporte, se analizará si los cálculos realizados en diseño original proyectado con datos climatológicos con periodo de retorno de 25 años, son válidos para las proyecciones obtenidas en los índices climáticos analizados.