

02-001

DEVELOPING CONSTRUCTION-RELEVANT WEATHER MAPS FOR PROJECT MANAGERS: APPLICATION TO THE UK

Ballesteros-Pérez, Pablo⁽¹⁾; Smith, Stefan Thor⁽²⁾; Lloyd-Papworth, Josephine Gwen⁽²⁾; Cooke, Peter⁽²⁾

⁽¹⁾Loughborough University, ⁽²⁾University of Reading

Construction projects usually suffer from delays and cost overruns. Poor planning and control practices, as well as the impact of (adverse) weather, are two of the most common causes for these delays and cost overruns. However, there are still very few practical tools that allow construction managers to take into account the potential impact of weather in real settings.

This paper describes how a series of construction-relevant maps were developed to be used by UK construction managers during the planning and execution stages of any project. These maps synthesize large weather historical information from multiple weather stations across the country. Particularly, these maps represent the average proportion of workable days of a series of common and standard construction activities that belong to most construction projects. Applications of the information contained in these maps allow for: optimising the start date of any project (so that its cost and duration can be reduced), anticipating the likely project duration distribution as a function of the project start date and its location(s); and dealing with weather-related claims in an objective and fair manner.

Keywords: *weather; productivity; construction; delays; climate; United Kingdom*

DESARROLLO DE MAPAS CLIMATOLÓGICOS PARA DIRECTORES DE PROYECTOS DE OBRAS DE CONSTRUCCIÓN: APLICACIÓN EN EL REINO UNIDO

Los proyectos de construcción habitualmente sufren retrasos e incrementos de coste. Mala planificación y seguimiento, además de una climatología adversa, son dos de las causas más comunes por las que se producen estos retrasos y sobrecostes. Sin embargo, existen muy pocas herramientas prácticas que permitan a directores de proyectos de construcción el tener en cuenta el potencial impacto del mal tiempo en contextos reales. Este artículo describe cómo se desarrollaron unos mapas específicamente orientados al ámbito de la construcción y que son relevantes tanto para las fases de planificación como de ejecución de cualquier proyecto. Estos mapas concentran una amplia cantidad de información histórica de múltiples estaciones meteorológicas del país. En particular, estos mapas representan la proporción media de ‘trabajabilidad’ (probabilidad de poder ejecutar la tarea en cuestión) cuando se ejecutan una serie de actividades que suelen formar parte de una gran mayoría de proyectos de construcción. Entre las aplicaciones de la información de estos mapas se podrán efectuar: optimizaciones de la fecha de comienzo de cualquier proyectos (de tal manera que su coste y duración puedan reducirse); anticipar la distribución probabilística de la duración del proyecto; y gestionar reclamaciones vinculadas con mala climatología de una manera objetiva y justa.

Palabras clave: *tiempo; productividad; construcción; retrasos; clima; Reino Unido*

Correspondencia: Pablo Ballesteros-Pérez; p.ballesteros@lboro.ac.uk



©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Muchos proyectos de construcción no terminan más tarde de lo planeado. Éste es un fenómeno común en muchos países y que afecta prácticamente todas las tipologías de proyectos de construcción (Alaghbari et al., 2007). Las finalizaciones tardías (entendiendo 'tardío' como infringir la fecha de finalización inicialmente acordada entre el contratista y el cliente) tiene repercusiones, comúnmente negativas, para casi todas las partes interesadas (stakeholders) (Thorpe & Karan, 2008).

Entre las causas comunes de retrasos en proyectos, la meteorología es consistentemente una de las más frecuentes y entre las que genera mayores impactos (Orangi et al., 2011). El tiempo (meteorológico) puede afectar a los proyectos de múltiples formas: disminuyendo la productividad y a veces deteniendo totalmente la producción (Rogalska et al., 2006); estropeando elementos construidos expuestos, no finalizados y/o no protegidos (El-Rayes & Moselhi, 2001); interrumpiendo las vías de comunicación y acceso (Alarcón et al., 2005); por citar algunas.

Cuando se categorizan los impactos de la meteorología, es común diferenciar entre tiempo (meteorológico) predecible e impredecible (Tian & De Wilde, 2011), así como entre eventos meteorológicos extremos y no extremos (pero generalmente combinados y/o persistentes) (Jung et al., 2016).

El tiempo predecible generalmente englobe los eventos meteorológicos extremos que pueden impactar la ejecución o explotación de cualquier infraestructura a menos que se hayan tomado medidas preventivas. Tener en consideración el tiempo 'predecible' es más frecuente durante la fase de construcción de proyectos especiales tales como puentes largos y expuestos o edificios altos (Jung et al., 2016; Tanijiri et al., 1997). Estos tipos de proyectos generalmente tienen elevados presupuestos y es, por tanto, más probable que dispongan de recursos para monitorizar cómo y cuándo se producirán cambios meteorológicos que puedan afectar la ejecución. En cuanto al tiempo impredecible, éste tiene generalmente más que ver con fenómenos que se producen más allá de la ventana de predicción de casi todos los modelos de predicción disponibles y que suele coincidir con entre 10 y 14 días.

Lamentablemente, gran parte de las decisiones que se toman en proyectos de construcción deben tomarse con una antelación superior a dicha ventana de tiempo, lo que justifica la necesidad de generar modelos que sean capaces de incluir, no tan solo la meteorología, son también el perfil climatológico de una zona extensa del territorio.

Esta comunicación describe un método para procesar información climatológica desde una perspectiva que sea relevante para los proyectos de construcción. En particular, se analizarán combinaciones de variables meteorológicas y sus intensidades umbral, a partir de las cuales algunas actividades comunes de proyectos de construcción no pueden ser ejecutadas. El producto generado permitirá a directores de proyectos de construcción el gestionar sus proyectos teniendo mucho más presente el factor climatológico de las ubicaciones donde estén trabajando. Todos los métodos serán desarrollados siguiendo su aplicación en el Reino Unido.

2. Revisión de la literatura

La cantidad de trabajos de investigación acerca de cómo la meteorología afecta los proyectos de construcción es abundante. Sin embargo, existen muy pocos modelos cuantitativos para

medir, y mucho menos anticipar, hasta qué grado el clima, a lo largo de las diferentes estaciones del año, puede causar un impacto en la productividad de los proyectos.

Una muestra exhaustiva de los modelos cuantitativos desarrollados fue compilada y analizada por Ballesteros-Pérez et al. (2017). Dicho análisis no será reproducido aquí por motivos de espacio. No obstante, de su análisis puede verse claramente que casi todos los trabajos se han publicado en los últimos diez años, y que una gran mayoría hacen referencia a la construcción de edificios únicamente. Adicionalmente, la mayoría de estudios se han focalizado en un grupo muy reducido de actividades y/o han considerado un número muy limitado de variables climatológicas. Esto generalmente constituye una simplificación necesaria debido a la dificultad de obtener una cantidad de información suficiente (tanto en cantidad de años atrás, en su periodicidad, y proveniente de suficientes pero cercanas estaciones) en la zona de interés

El método propuesto posteriormente puede ser considerado como una continuación de la investigación de Ballesteros-Pérez et al. (2015, 2017b). Sus modelos fueron adaptados a dos tipos de proyectos (puentes y edificios), pero consideraron una cantidad muy variada de actividades de construcción y de variables meteorológicas. Modelos como éste son de gran interés, ya que permiten obtener una gran cobertura del territorio y aplicarlos a otros proyectos dentro del mismo país o región. Esto significa que podrían permitir su uso por gobiernos como herramientas de planificación, pero también por contratistas variados para planificar y monitorizar sus posibles pérdidas de producción.

Sin embargo, el método propuesto extiende el alcance de las investigaciones previas de estos autores. La mayoría de investigaciones anteriores (incluyendo las de Ballesteros-Pérez et al.) han requerido o bien series probabilísticas o bien series temporales extraídas de la variación de muchos parámetros y ubicaciones discretas. Algunos investigadores también han desarrollado trabajo con registros sintéticos a partir de series largas de parámetros discretos modelizando el tiempo local. En contraste, el método propuesto aquí tan sólo requiere de simples onda senoidales con uno, dos o tres parámetros (dependiendo del nivel de precisión requerido). Ésta es una ventaja significativa ya que la simplicidad de estas expresiones permitirá que muchos directores de proyectos de construcción puedan implementarlas en la práctica real con apenas conocimientos matemáticos.

Por otro lado, a nivel climatológico, el tiempo agrupa la confluencia de múltiples fenómenos (viento, lluvia, temperatura, etc.) que a menudo no evidencian una correlación clara entre sí (Ballesteros-Pérez et al., 2017). Los estudios que analizan la variabilidad estacional de estas combinaciones de agentes meteorológicos son también muy escasos (Kim & Augenbroe, 2012). Sin embargo, es precisamente esta variabilidad (estacional o incluso sub-estacional) la que hace del predecir la climatología y su impacto en proyectos de construcción, una tarea difícil.

La primera etapa, por tanto, será decidir qué combinaciones de variables meteorológicas y sus intensidades asociadas determinan que algunas actividades de construcción no puedan ser ejecutadas. El impacto de estas variables y sus intensidades, no obstante, podría ser muy distintos dependiendo de: las tecnologías de construcción utilizadas; el equipamiento y maquinaria disponible; los materiales y procedimientos adoptados; cómo de expuesto el proyecto está; cómo de persistente los fenómenos meteorológicos son; qué es considerado como la climatología 'promedio' (o habitual) en una región particular, etc. Sin embargo, esto no debe servir de excusa para no tratar de establecer unos límites aproximados que, bajo ciertas condiciones comunes (p. ej. dentro del mismo país, similares prácticas, tecnologías, procedimientos y materiales de construcción) puedan ser consideradas como relativamente 'representativos' para gran parte de los proyectos de construcción. En particular, este estudio considerará las variables y umbrales descritas por Ballesteros-Pérez et al. (2017) las cuales han sido parcialmente resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Combinaciones de variables climatológicas y umbrales para días no trabajables

Movimiento de tierra (E), Hormigón (C), Encofrado/Andamiaje (F), Aceros (S),
 Pinturas exteriores (O), Pavimentos asfálticos (P).

Var. climatológica (valor diario)	E	C	F	S	O	P
Temperatura mínima $\leq 0^{\circ}\text{C}$		x				x
Temperatura promedio $\leq 0^{\circ}\text{C}$	x			x	x	
Temperatura máxima $\geq 40^{\circ}\text{C}$		x		x		x
Precipitación $\geq 1\text{mm}$					x	x
Precipitación $\geq 10\text{mm}$	x	x				
Precipitación $\geq 30\text{mm}$				x		
Precipitación de granizo					x	x
Precipitación de nieve					x	x
Tormenta eléctrica			x	x		
Ráfagas de viento ≥ 30 nudos		x	x	x	x	

Como se ha indicado, esta combinación de variables podría no ser la más apropiada para muchos países o contextos. Sin embargo, se considera suficientemente representativa para el Reino Unido que fue donde este método será aplicado posteriormente.

3. Materiales y métodos

3.1 Resumen del método

Esta sección describe cómo se procesó la información meteorológica desde un punto de vista relevante para proyectos de construcción. La información empleada se limitó a la obtenida a partir de estaciones meteorológicas terrestres, dado que éstas normalmente registran una mayor variedad de variables frente a las marítimas, por ejemplo, y disponen de mayor cantidad de años en su histórico de registros. Conocido esto, el método tuvo tres etapas.

La primera etapa supuso la recopilación y análisis de información meteorológica diaria de la mayor cantidad posible de estaciones británicas. El análisis implicó el cálculo de qué porcentaje de días se consideraron 'trabajables', donde trabajable significa que ninguna de las variables meteorológicas excedió los umbrales especificados en la Tabla 1. Específicamente, el análisis supuso calcular, para cada día del año, estación y tipo de actividad (E, C, F, S, O y P) cuántas veces durante los últimos 30 años ese día (1 de Enero, 2 de Enero... 31 de Diciembre) había sido trabajable.

La segunda etapa involucró el ajuste de ondas senoidales a los datos diarios procesados de la etapa primera, para cada estación y tipo de actividad. Cada onda senoidal puede ser definida con entre uno y tres parámetros y, a su vez, los valores espaciales de estos tres parámetros fueron representados en mapas territoriales con isóneas (ver Figura 2). El propósito de estos mapas fue el de permitir extrapolar los valores de las ondas senoidales cuando no hubiera ninguna estación cercana.

Finalmente, la tercera etapa comprende la aplicación de la información procesada en forma de mapas cronogramas de proyectos reales de construcción. Al aplicar esta información es posible conocer qué duración (y coste) extra un proyecto podría sufrir como consecuencia del tiempo y tomar acciones anticipadas si se considera necesario.

3.2 Análisis de la información climatológica de Reino Unido

Primero, información meteorológica diaria fue recopilada de las bases de datos de la UK Met Office, organismo encargado de todo lo relacionado con el registro y análisis climatológico en el Reino Unido. Únicamente se analizaron estaciones entre cuyos registros hubiera

mediciones de todas las variables listadas en la columna izquierda de la Tabla 1 y entre los últimos 20 y 30 años (es decir que dispusieran de datos desde 1996 ó 1986, respectivamente, hasta la actualidad). Esta cantidad de años fue exigida dado que 30 años es la cantidad de años generalmente asumida como representativa de un ciclo climático, pero, al ser probablemente excesiva en este estudio se rebajó la cantidad a 20 años también con la finalidad de disponer de mayor cantidad de estaciones para el análisis. Finalmente 102 estaciones del Reino Unido cumplían estos criterios.

El siguiente paso supuso calcular los Coeficientes de Reducción Climática (CRC). Un CRC representa el porcentaje de ocasiones en el que ese día del año ha sido ‘trabajable’ para un tipo de actividad concreto. Esto significa que el umbral de ninguna variable climática de la Tabla 1 fue excedido durante ese día. Generalmente los CRC se expresan en tanto por uno y los valores diarios han sido representados en la curva de color negro en el ejemplo de la Figura 1 para una estación en particular (Bala) y un tipo de actividad concreta (encontrados/andamiajes).

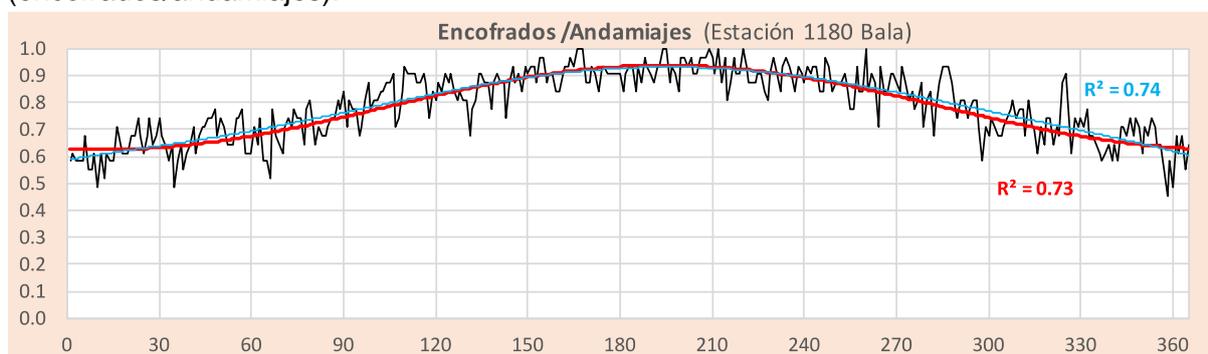


Figura 1: Ejemplos de cálculo de los CRC para dos tipos de actividades

No obstante, los valores diarios de los CRC tienen cierta variabilidad y por ello se ajustaron a esas series de datos dos curvas más suaves. La curva de control se correspondió con un polinomio de sexto grado representada en color azul en la Figura 1. Ésta curva aproximadamente representa el mejor ajuste que era posible obtener, pero a costa de utilizar muchos parámetros (siete en este caso). La otra curva de ajuste fueron ondas senoidales (también llamadas sinusoidales o sinusoidales) representadas en color rojo en la Figura 1. Como puede observarse no hay mucha diferencia entre los ajustes de ambas curvas. Esta diferencia reducida fue un hecho generalizado para la mayoría de estaciones y tipos de actividades por lo que se prefirió utilizar ondas senoidales desde ese momento. Esto porque las ondas senoidales podía ser definidas con un número muy inferior de parámetros.

3.3 Reducción de la variabilidad meteorológica a ondas senoidales

Tal como se ejemplificó en la Figura 1, las expresiones senoidales se ajustaron a los datos diarios de CRC para cada estación y tipo de actividad. Las ondas senoidales, en este caso, son expresiones matemáticas cuya ecuación y parámetros fueron definidos de esta forma:

$$y = \text{CRC} = K + A \cdot \cos(2\pi f(x/365 - \phi)) \quad (1)$$

donde:

CRC: Coeficientes de Reducción Climática (E, C, F, S, O, P). Porcentaje (en tanto por uno) de días trabajables para cada día del año x.

x: día del año (del 1 al 365). En años bisiestos, por facilidad de computación, el 29 de febrero corresponde al x=59.5

K: desplazamiento vertical (en tanto por uno). Aproximadamente K corresponde a la

media geométrica anual de los valores de CRC.

- A: amplitud (en tanto por uno). Aproximadamente corresponde a la máxima oscilación positiva y negativa respecto del valor de K a lo largo del año
- f: frecuencia. Se forzó a tomar el valor de 1 para que los 365 días del año coincidieran con un ciclo completo.
- ϕ : cambio de fase (en tanto por uno). Corresponde al día del año (pero en tanto por uno) en el que la onda senoidal alcanza su máximo valor (es decir, el día del año en el que las condiciones meteorológicas se espera que sean las mejores para ejecutar cierta actividad).

Por tanto, cada onda senoidal tiene tres parámetros (K, A y ϕ). Los valores de estos parámetros para cada serie de cada estación y tipo de actividad fueron obtenidos por un proceso de optimización no lineal tratando de minimizar los cuadrados entre los valores reales de los CRC y los obtenidos por cada nueva combinación de K, A y ϕ .

Sin embargo, los valores de K, A y ϕ . No son necesariamente útiles en cualquier ubicación de la geografía británica a menos que hubiera una estación meteorológica cercana. Por este motivo se construyeron los mapas de isolíneas tratando de representar una interpolación de los valores de estos tres parámetros. Ejemplos de estos mapas para un tipo de actividad han sido representados en la Figura 2.

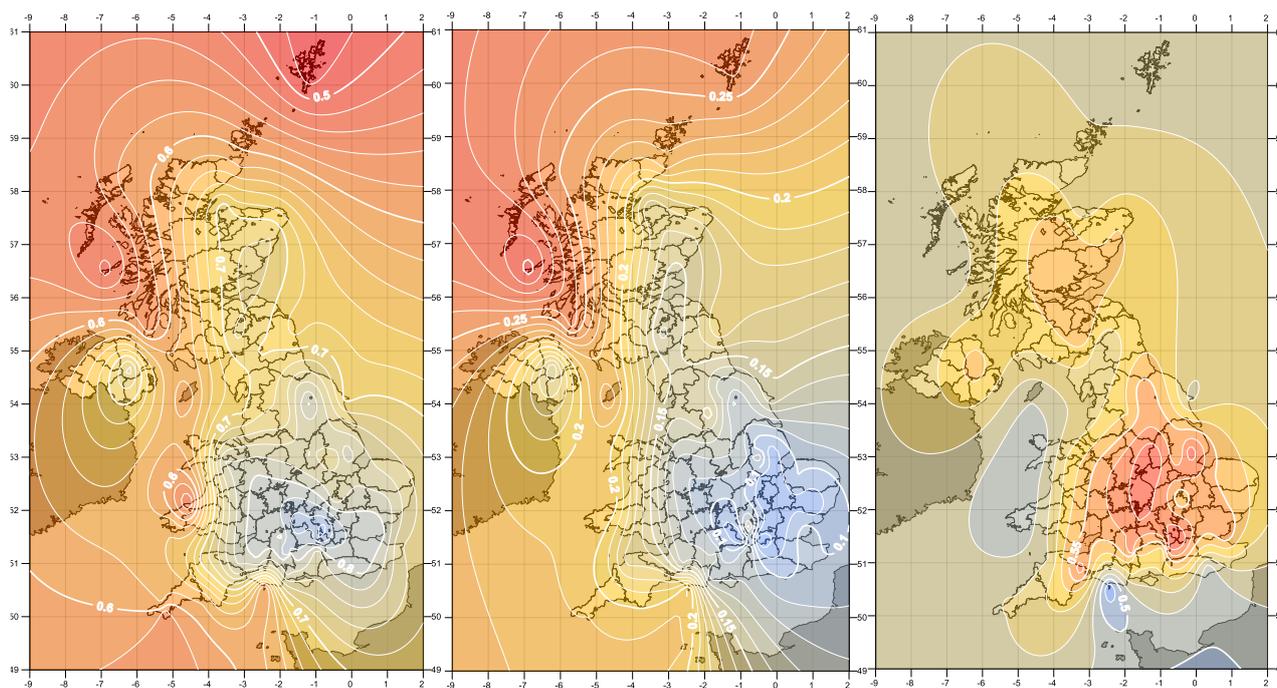


Figura 2: Mapas ejemplo del Desplazamiento Vertical K (izquierda), Amplitud A (centro) y cambio de fase ϕ (derecha) para actividades de encofrados/andamiaje en Reino Unido

Estos mapas de líneas de contorno o isolíneas fueron creados a partir de rejillas de datos interpolados con modelos de Kriging. Kriging, también conocido como regresión gaussiana, es un método de interpolación por el que los valores interpolados son asignados conforme a un proceso gaussiano gobernado por covarianza anteriores. Bajo unas hipótesis bastante relajadas respecto de dichas covarianzas, la interpolación de Kriging proporciona las mejores estimaciones no sesgadas de los puntos intermedios entre cualquier nube de puntos. Por este motivo dicho modelo fue utilizado en la elaboración de los mapas mostrados en la Figura 2.

El resto de mapas se encuentra en posesión de los autores y en caso de necesitar una copia puede ser debidamente solicitada a sus direcciones de email.

Adicionalmente, uno de los objetivos de este estudio era el de desarrollar una serie de expresiones que fueran, no sólo tan representativas como fuera posible, sino también tan sencillas como fuera posible. Por tanto, tras obtener los valores de K , A y ϕ para cada una de las 102 estaciones y los seis tipos de actividades, los valores de dichos parámetros fueron representados en dos gráficos como los de la Figura 3. El objeto de los mismos fue el de encontrar algún tipo de correlación entre los parámetros con tal de poder reducir aún más el número de parámetros de las ondas senoidales. Es decir, observar si A ó ϕ podrían expresarse en función de K , y trabajar a partir de ese momento con expresiones senoidales monoparamétricas.

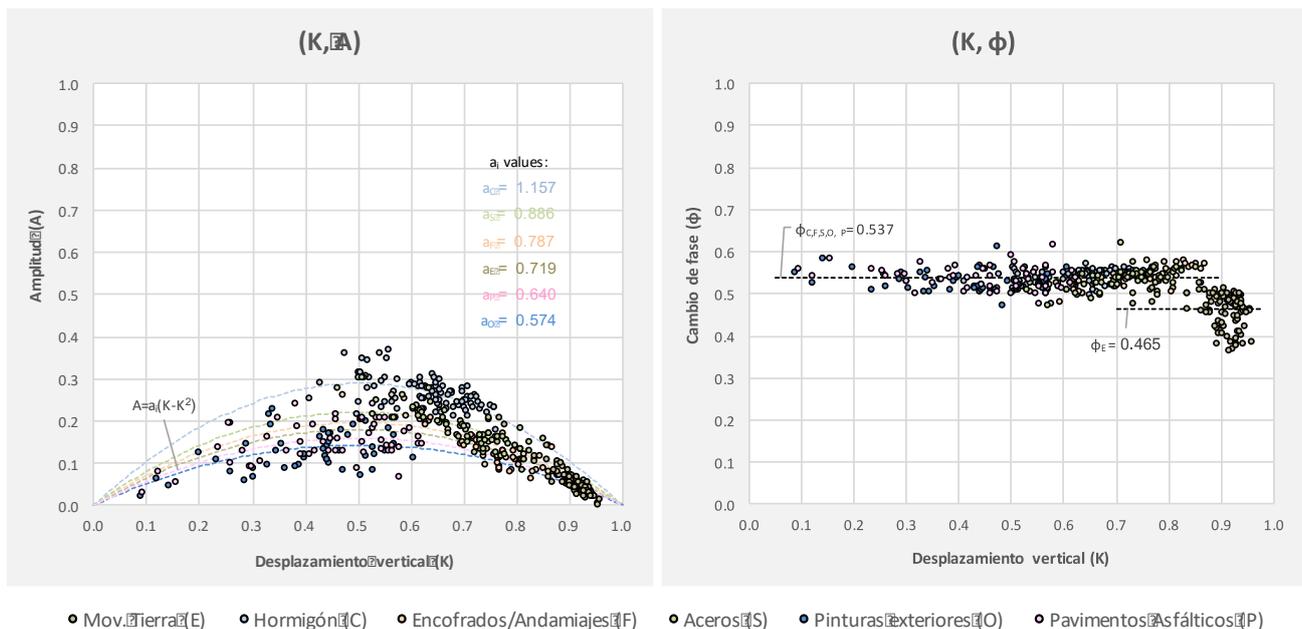


Figura 3: Representaciones de los valores de K , A y ϕ con expresiones de regresión adoptadas

Tal vez sorprendentemente, la amplitud A exhibió un alto grado de correlación con K . Esto es probablemente porque ambos parámetros comparten similares condiciones de contorno. Por ejemplo, cuando K alcanza sus valores extremos ($K=0$ ó $K=1$), el valor de la amplitud no puede sino ser nulo ($A=0$) dado que no puede existir oscilación alguna. Análogamente, es estadísticamente mucho más probable que la amplitud A pueda ser máxima cuando el valor de K está en el medio de su rango de variación ($K=0.5$). Esto supuso que recurriendo a una expresión cuadrática (parabólica) forzando a pasar por $(0,0)$ y $(1,0)$, A pudiera ser expresada en función de K con la siguiente expresión: $A = a_i(K - K^2)$, donde los valores del parámetro de ajuste a_i fueron, obviamente distintos para cada tipo de actividad y reflejados en la parte izquierda de la Figura 3.

En contraste, existía muy poca correlación entre K y ϕ , pero esto fue porque ϕ apenas varía espacialmente y mucho menos en función de K . Esto es sencillo de comprobar al observar como la gran mayoría de valores de ϕ se alinean bajo una línea horizontal en el gráfico derecho de la Figura 3. Por tanto, a partir de este momento era bastante razonable asumir que el valor de ϕ podría ser considerado como una constante para cada tipo de actividad (de todos los tipos de actividad comparten el mismo valor constante, 0.537, salvo los movimientos de tierra que tenían marcadas diferencias y para los que se asumió 0.465).

En resumen, las expresiones tripamétricas (3-p) de las ondas senoidales pudieron ser reducidas a expresiones bipamétricas (2-p) o monopamétricas (1-p) asumiendo cierta

pérdida de precisión, pero facilitando enormemente los cálculos y la cantidad de mapas requeridos.

La única comprobación pendiente era chequear que las aproximaciones biparamétricas y monoparamétricas constituyen aproximaciones suficientemente buenas. Para ello se calcularon los errores de utilizar dichas expresiones y se compararon frente a la variación diaria promedio entre puntos vecinos, todo lo cual ha sido resumido en la Tabla 2.

Tabla 2. Medidas de error de las estimaciones de los CRC

Datos	Error	E	C	F	S	O	P	Avg.
Onda senoidal (3-p) (K, A & φ son libres)	MSE	0.004	0.017	0.012	0.016	0.017	0.017	0.01
	MAE	0.050	0.076	0.083	0.095	0.096	0.097	0.08
	MAPE	0.058	0.140	0.124	0.148	0.276	0.261	0.17
Onda senoidal (2-p) (K & A son libres, φ =constante)	MSE	0.005	0.010	0.013	0.017	0.017	0.017	0.01
	MAE	0.051	0.077	0.084	0.096	0.097	0.098	0.08
	MAPE	0.058	0.143	0.126	0.150	0.278	0.263	0.17
Onda senoidal (1-p) (K libre, A=f(K) & φ =constante)	MSE	0.005	0.010	0.013	0.017	0.018	0.018	0.01
	MAE	0.052	0.080	0.086	0.098	0.100	0.100	0.09
	MAPE	0.059	0.146	0.128	0.151	0.285	0.268	0.17
Desviaciones entre puntos vecinos (val. CRC consecutivos)	MSE	0.006	0.012	0.018	0.023	0.023	0.024	0.02
	MAE	0.057	0.084	0.098	0.108	0.112	0.114	0.10
	MAPE	0.067	0.168	0.157	0.184	0.337	0.322	0.21

La Tabla 2 contiene los errores cuadrados promedio (Mean Square Errors, MSE), los errores absolutos promedio (Mean Absolute Errors, MAE) y los errores relativos promedio (Mean Absolute Percentage Errors, MAPE) para las tres aproximaciones senoidales (3-p, 2-p y 1-p) y para cada tipo de actividad considerada (E, C, F, S, O y P). También en las líneas inferiores se incluye una serie de mediciones describiendo cuánto los valores de CRC variaban en promedio entre puntos consecutivos, es decir, entre días consecutivos (x y $x+1$). La inclusión de estas líneas inferiores es porque permiten tener un orden de magnitud para poder comparar si los errores entre las aproximaciones superiores son reducidos o no.

De la lectura de la Tabla 2 puede deducirse que los errores de recurrir a expresiones biparamétricas y monoparamétricas no son apenas muy distintos respecto de los de las expresiones triparamétricas, sino que son significativamente menores que la propia variación de los CRC entre puntos vecinos.

Finalmente, de la lectura de los valores promedio situados en la columna derecha de la Tabla 2 también puede ser entendido que las ondas senoidales propuestas capturan entre el 74% (en el peor caso) y el 95% (en el mejor caso) de la variabilidad meteorológica, y que esto se ha conseguido por medio de expresiones matemáticas extremadamente sencillas. El siguiente paso, no obstante, debe comprender cómo implementarlas en la práctica real y observar si las simplificaciones con menor número de parámetros realmente no divergen tanto de las lecturas obtenidas por expresiones triparamétricas.

4. Caso de estudio

El cronograma propuesto en la Figura 4 representa la construcción de un edificio de 3 plantas con estructura de hormigón armado. Por motivos ilustrativos este cronograma ha sido simplificado y reducido a una cantidad mínima de actividades (24 en total) las cuales se han organizado en torno a tres paquetes de trabajo.

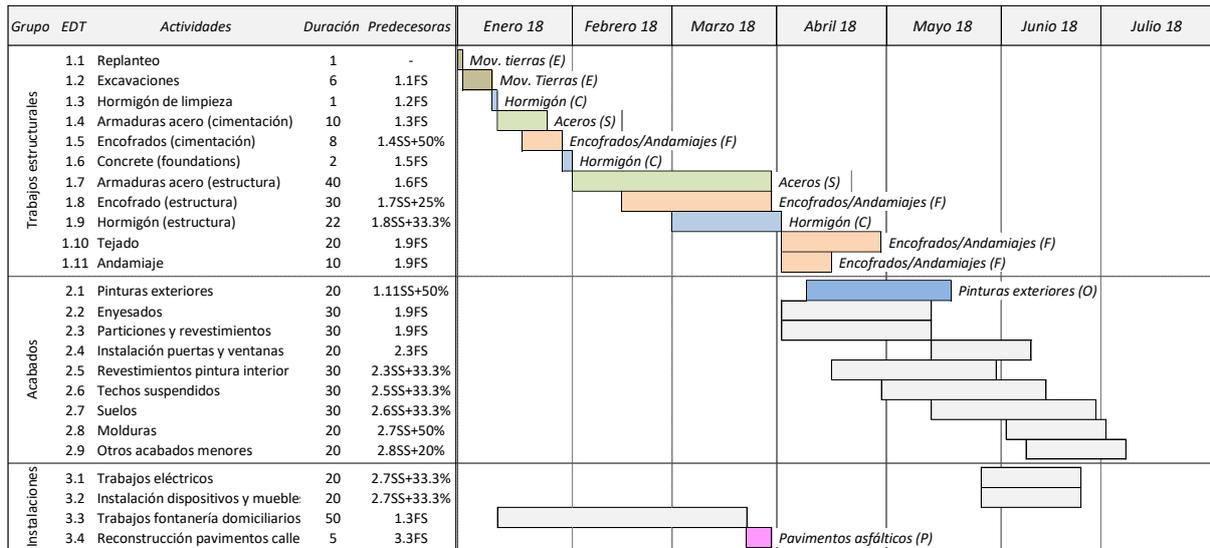


Figura 4: Cronograma simplificado de construcción de un edificio en hormigón armado

La Figura 4 representa un cronograma en el que todavía no se ha considerado la influencia meteorológica en sus actividades. La forma de calcular la influencia del tiempo es relativamente sencilla.

El primer paso consiste en identificar a qué tipo de actividad cada una de las actividades del cronograma se parece o comparte más sensibilidad climática. Por ejemplo, por medio de diferentes colores, en las barras de la derecha se han asignado diferentes tipos de CRC a cada actividad. Las actividades con color gris coinciden con actividades que no son susceptibles a la influencia de la climatología, probablemente porque se ejecutan a cubierto.

El segundo paso supone calcular cuánta mayor duración las actividades en color distinto al gris tendrán una vez el proyecto haya comenzado. Para ello es necesario recurrir a las ondas senoidales en función de la tipología de cada actividad (E, C, F, S, O y P) y de cuándo es la fecha de comienzo ($1 \leq x \leq 365$) de cada una de las actividades del cronograma. Los valores apropiados de K, A y ϕ pueden ser tomados en función de la ubicación del proyecto en mapas como los de la Figura 2 o, como se hizo en esta ocasión, de una rejilla de puntos organizada por coordenadas de longitud y latitud.

Particularmente, el cálculo de las nuevas duraciones de cada actividad se realiza como sigue. Una vez calculadas las actividades predecesoras, la fecha de comienzo de cada actividad es conocida (x). A partir de ese día x empiezan a calcularse valores de x en los días sucesivos (x, x+1, x+2, ...) y se van sumando acumulativamente hasta que la cantidad sumada iguale la duración original de la actividad. De este modo, por ejemplo, si una actividad, independientemente de la meteorología duraba 10 días, se irán generando valores de su curva senoidal para esa ubicación, tipo de actividad y día de comienzo x hasta que sumados den una cantidad de 10 días. Hay que tener presente que los valores generados por las curvas senoidales representan CRC cuyos valores siempre están entre 0 y 1. Esto quiere decir que la cantidad de días x a sumar siempre será igual o superior a la duración original de la actividad (por ejemplo, en 15 días los CRC han sumado 10 días en total, por tanto, 15 días es la nueva duración promedio de nuestra actividad de análisis). Este proceso puede ser repetido en orden cronológico para todas las actividades del cronograma.

Si estos dos pasos se aplican a nuestro edificio de ejemplo, suponiendo que el proyecto podría comenzar en cualquier día del año (no únicamente el 1 de enero como indica la Figura 4) y en cualquier ciudad de Reino Unido, el resultado es el representado en la Figura 5. Para el cálculo de estas duraciones se asumió que sábados y domingo eran no laborables.

Ciudad (UK)	Region	Ondas en el estado (2-p) [Efectivo (en horas)]			Ondas en el estado (2-p) [Invernal (en horas)]			Ondas en el estado (2-p) [Erosión (en horas)]			Ondas en el estado (1-p) [Aproximaciones (en días)]			Ondas en el estado (1-p) [Errores absolutos]					
		Promedio	Duración	Díam. máx.	Promedio	Duración	Díam. máx.	Promedio	Duración	Díam. máx.	Promedio	Duración	Díam. máx.	Promedio	Duración	Díam. máx.			
Aberdeen	Escocia	232.7	198	272	232.8	198	272	232.8	198	272	228.8	218	241	122	272	3.9	20	31	7
Armagh	Irlanda del N.	224.6	194	257	224.5	194	256	224.5	194	256	221.8	207	236	134	291	2.8	13	0	21
Bangor	Gales	255.0	211	304	254.8	212	301	254.8	212	301	252.0	215	287	120	257	3.0	4	17	4
Bath	Inglaterra	216.5	192	245	216.5	193	245	216.5	193	245	214.2	201	227	120	300	2.3	9	18	23
Belfast	Irlanda del N.	229.2	197	263	229.0	197	263	229.0	197	263	225.0	213	237	135	276	4.1	16	26	1
Birmingham	Inglaterra	214.9	193	242	214.9	193	242	214.9	193	242	212.9	204	223	114	297	2.0	11	19	1
Birmingham	Inglaterra	230.2	194	266	230.1	194	265	230.1	194	265	226.4	207	242	106	272	3.8	13	24	21
Brighton & Hove	Inglaterra	213.7	193	238	213.7	193	237	213.7	193	237	212.7	201	227	127	300	0.9	8	11	7
Bristol	Inglaterra	215.8	192	244	215.7	192	244	215.7	192	244	213.4	201	224	113	289	2.4	9	21	28
Cambridge	Inglaterra	216.9	193	244	216.9	193	244	216.9	193	244	215.1	205	224	143	284	1.9	12	20	16
Canterbury	Inglaterra	214.6	194	236	214.6	194	236	214.6	194	236	213.9	205	224	123	290	0.7	11	12	4
Cardiff	Gales	216.9	192	248	216.8	192	248	216.8	192	248	214.7	200	229	134	286	2.2	8	19	8
Cardiff	Gales	214.4	226	308	214.4	226	312	214.4	226	312	212.0	239	307	40	188	1.6	13	1	31
Cardiff	Gales	211.4	226	308	211.4	226	312	211.4	226	312	210.9	201	220	113	286	1.1	8	15	7
Chelmsford	Inglaterra	212.0	193	235	212.0	193	235	212.0	193	235	210.9	201	220	113	286	1.1	8	15	7
Chelmsford	Inglaterra	218.5	193	250	218.4	193	249	218.4	193	249	216.3	206	228	120	272	2.2	13	22	0
Chichester	Inglaterra	217.1	194	243	217.2	194	243	217.2	194	243	215.5	205	227	128	279	1.6	11	16	6
Coventry	Inglaterra	212.6	192	237	212.6	192	238	212.6	192	238	211.1	201	227	113	305	1.4	9	15	7
Coventry	Inglaterra	216.7	193	244	216.7	193	245	216.7	193	245	215.0	204	227	106	272	1.7	11	21	12
Derby	Inglaterra	231.8	196	276	231.6	197	276	231.6	197	276	227.5	215	242	106	306	4.3	19	34	24
Dundee	Escocia	233.9	197	272	233.8	198	271	233.8	198	271	231.0	213	231	113	293	5.7	18	29	22
Durham	Inglaterra	238.1	197	280	238.0	197	279	238.0	197	279	235.0	213	231	106	292	7.1	16	29	34
Edinburgh	Escocia	219.0	194	248	219.1	194	248	219.1	194	248	216.9	206	229	156	288	2.1	12	19	29
Ely	Inglaterra	224.8	194	258	224.8	194	259	224.8	194	259	222.4	205	238	128	289	2.4	11	20	1
Exeter	Inglaterra	255.4	201	294	255.9	201	294	255.9	201	294	246.7	221	265	99	230	8.6	20	29	14
Exeter	Inglaterra	215.2	192	243	215.1	192	243	215.1	192	243	212.8	201	224	106	303	2.4	9	19	42
Gloucester	Inglaterra	215.3	192	244	215.4	192	244	215.4	192	244	212.9	201	224	107	299	2.3	9	20	14
Hereford	Inglaterra	250.1	197	300	249.9	197	298	249.9	197	298	239.7	215	263	134	272	10.3	18	37	2
Inverness	Escocia	219.4	197	248	219.4	197	245	219.4	197	245	217.8	211	227	93	272	1.6	14	21	61
Kingston upon Hull	Inglaterra	231.7	200	265	231.7	200	265	231.7	200	265	227.5	214	242	107	278	4.2	14	23	6
Lancaster	Inglaterra	233.0	200	266	233.0	200	266	233.0	200	266	232.1	213	251	93	209	1.0	13	15	6
Leeds	Inglaterra	215.1	193	241	215.1	193	242	215.1	193	242	213.5	204	224	99	293	1.6	11	17	28
Leicester	Inglaterra	215.8	193	243	215.8	193	244	215.8	193	244	213.9	204	224	129	285	1.9	11	19	9
Lichfield	Inglaterra	217.8	197	243	217.8	197	243	217.8	197	243	216.0	206	227	127	286	1.8	9	16	4
Lincoln	Inglaterra	223.5	194	255	223.4	194	255	223.4	194	255	221.1	208	234	141	272	2.5	14	21	14
Liverpool	Inglaterra	221.1	194	251	221.2	194	250	221.2	194	250	218.9	211	229	122	293	2.2	17	22	2
Liverpool	Inglaterra	211.3	193	234	211.4	193	234	211.4	193	234	210.2	200	221	100	278	1.1	7	13	6
London	Inglaterra	239.0	200	278	239.0	200	278	239.0	200	278	233.3	217	251	108	269	5.7	17	27	12
London	Inglaterra	225.6	194	260	225.5	194	260	225.5	194	260	222.0	207	237	113	278	3.6	13	23	14
Manchester	Inglaterra	234.6	199	272	234.6	199	272	234.6	199	272	229.2	215	243	134	278	5.4	16	29	7
Newcastle upon Tyne	Inglaterra	215.8	191	245	215.8	192	245	215.8	192	245	213.4	200	228	120	306	2.4	9	17	36
Newport	Gales	223.3	194	256	223.3	194	256	223.3	194	256	220.8	208	234	134	293	2.5	14	21	7
Newry	Irlanda del N.	220.5	198	246	220.5	198	246	220.5	198	246	219.1	211	228	122	265	1.4	13	18	19
Norwich	Inglaterra	217.9	193	245	218.0	193	245	218.0	193	245	216.2	205	228	136	271	1.7	17	2	15
Nottingham	Inglaterra	211.6	191	237	211.6	191	237	211.6	191	237	209.3	199	221	108	292	2.3	8	16	4
Oxford	Inglaterra	235.1	194	276	235.2	194	276	235.2	194	276	228.2	213	244	108	282	6.9	19	32	26
Perth	Escocia	220.2	198	248	220.2	198	248	220.2	198	248	218.4	208	229	141	284	1.8	10	19	5
Peterborough	Inglaterra	235.7	201	272	235.7	201	272	235.7	201	272	233.1	219	249	102	265	2.6	18	23	25
Plymouth	Inglaterra	218.6	194	246	218.5	194	246	218.5	194	246	216.5	205	228	120	278	2.1	11	18	0
Portsmouth	Inglaterra	229.2	199	265	229.2	199	264	229.2	199	264	225.8	213	239	113	291	3.3	14	26	23
Preston	Inglaterra	225.3	194	259	225.3	194	259	225.3	194	259	223.1	208	238	113	221	3.9	14	21	7
Ripon	Inglaterra	220.5	198	246	220.5	198	246	220.5	198	246	219.1	211	228	122	265	1.4	13	18	19
Salford	Inglaterra	217.9	193	245	218.0	193	245	218.0	193	245	216.2	205	228	136	271	1.7	17	2	15
Salford	Inglaterra	211.6	191	237	211.6	191	237	211.6	191	237	209.3	199	221	108	292	2.3	8	16	4
Salisbury	Inglaterra	235.1	194	276	235.2	194	276	235.2	194	276	228.2	213	244	108	282	6.9	19	32	26
Sheffield	Inglaterra	220.2	198	248	220.2	198	248	220.2	198	248	218.4	208	229	141	284	1.8	10	19	5
Sheffield	Inglaterra	235.7	201	272	235.7	201	272	235.7	201	272	233.1	219	249	102	265	2.6	18	23	25
Southampton	Inglaterra	218.7	193	249	218.7	193	249	218.7	193	249	216.5	205	229	120	284	2.5	12	20	14
Southampton	Inglaterra	212.1	193	236	212.2	193	236	212.2	193	236	210.7	201	220	106	279	0.4	8	16	0
Strabane	Gales	218.3	193	248	218.3	193	246	218.3	193	246	216.1	205	227	129	279	2.2	12	21	15
Strabane	Gales	239.0	204	278	239.0	204	278	239.0	204	278	235.8	221	250	113	263	3.2	17	28	0
StrDavid's	Gales	245.9	198	285	246.1	198	284	246.1	198	284	235.5	214	252	134	268	9.4	16	33	7
Stirling	Escocia	220.0	193	252	220.0	193	252	220.0	193	252	217.5	206	230	134	285	1.3	22	14	6
Stoke-on-Trent	Inglaterra	233.5	199																

El proyecto del edificio, antes de ser influenciado por la meteorología, duraba 186 días totales (incluyendo laborables y no laborables). No se consideraron días festivos adicionales. La razón por la que se incluyeron días no laborables y porque este proyecto duró inicialmente 6 meses es porque representa la configuración más extrema para comprobar la robustez de la herramienta propuesta. Proyectos de 6 meses son los que en general tendrán mayores variaciones en términos relativos (aunque no absolutos) respecto de la duración original. Esto ocurre porque proyectos más largos cuyas actividades caen en varias estaciones tienen cierto grado de cancelación (unas actividades se extienden un poco en verano y otras mucho en invierno, pero en promedio se extienden un grado intermedio). Adicionalmente incluir días no laborables (como los del fin de semana) hace que las duraciones del proyecto sumen dos por cada cinco días laborables. Las desviaciones, por tanto, son máximas con la configuración adoptada.

La Figura 5, por tanto, muestra las duraciones promedio del mismo proyecto en cada ciudad cuando podría haber empezado en cualquier día del año, y también expone las máximas y mínimas duraciones que el proyecto podría haber tenido y en qué día del año se habrían producido. Las diferentes columnas muestran los resultados arrojados de aplicar las expresiones senoidales triparamétricas, biparamétricas y monoparamétricas.

Las interpretaciones de esta figura son muy ricas y variadas, aquí se limitarán a las más destacables. En primer lugar, es posible observar que las extensiones de la duración del proyecto de 186 días pueden incrementarse un 21.6% en promedio. Este incremento de duración puede ser tan alto como 38.3%, o tan pequeño como 5.7% dependiendo de la fecha de comienzo del proyecto. Esto implica que, si fuera posible escoger inteligentemente la fecha de inicio del proyecto, en promedio, las duraciones podrían reducirse un $21.6\% - 5.7\% = 15.9\%$. Análogamente, todos los costes proporcionales a una menor duración (gastos indirectos y gastos generales, por ejemplo) también podrían reducirse proporcionalmente.

En segundo lugar, las desviaciones entre las expresiones triparamétricas y biparamétricas son, en general, bastante similares. En cuanto a diferencias de la duración estimada del proyecto ambas difieren en menos de un día en promedio. En cuanto a la detección de en qué día se producen esas diferencias la diferencia es de menos de una semana. Las expresiones biparamétricas constituyen muy buenas aproximaciones respecto de las triparamétricas, las cuales representan casi a la perfección la variabilidad climática de cualquier ubicación (aspecto que no se ha demostrado en la presente comunicación).

Finalmente, las aproximaciones monoparamétricas no son tan buenas. A nivel promedio proporcionan buenas aproximaciones (errores inferiores a 3 días), pero cuando intentan detectar las duraciones anuales máximas y mínimas que podría tener el proyecto, sus errores en la estimación de la duración difieren entre 2 y 3 semanas con respecto de las expresiones triparamétricas. En cuanto a la locación de en qué día del año se producen estas duraciones máximas y mínimas, sus máximos errores son del entorno de 2 semanas. Estas cantidades pueden parecer elevadas, pero, en realidad, tan sólo suponen entre un 3 y un 5% de error, y eso utilizando un solo parámetro y en las condiciones más difíciles posibles (proyecto de 6 meses con fines de semana). Las expresiones monoparamétricas, por tanto, son más que suficientes para obtener buenas aproximaciones con una muy reducida carga de cálculo.

5. Discusión

El caso de estudio mostrado ha implementado las expresiones senoidales propuestas en un ejemplo real. Claramente, la posibilidad de anticipar cuánta duración adicional tendrá casi cualquier tipo de actividad en función del tipo de actividad que es, dónde se ejecuta y cuando comienza abre las puertas para cálculos adicionales de optimización. Por ejemplo, por medio de la utilización de la herramienta será posible a) encontrar las fechas de comienzo óptimas, b) priorizar la ejecución de unos proyectos sobre otros o la asignación de recursos específicos

de tal manera que el cronograma progrese de la forma más expedita posible, o c) intentar buscar las mejores ubicaciones para un proyecto, si es que dicha opción es factible.

La herramienta propuesta se ha aplicado de forma determinista (únicamente mostrando duraciones promedio), pero también puede aplicarse de forma estocástica. Para conseguir esto tan solo es necesario considerar que cada día es un 1 (día trabajable) ó un 0 (día no trabajable). La posibilidad de tener un 1 ó un 0 dependerá de la probabilidad (valor del CRC) para cada día x obtenido de las ondas senoidales. Con cálculos estocásticos es posible obtener, por ejemplo, curva de probabilidad de la duración de cada proyecto para ubicación y día del año, entre muchas otras cosas.

Por último, la herramienta desarrollada también puede ser aplicada en sentido contrario para analizar si un proyecto que ya ha sido finalizado o está en progreso ha sufrido condiciones meteorológicas excepcionalmente adversas. En este caso se parte de las duraciones reales de las actividades (las cuales han sido influenciadas por la climatología durante su ejecución) y hay que obtener cuáles habrían sido las duraciones originales (antes de ser afectadas por la meteorología). Después se puede exponer ese mismo cronograma con duraciones originales a múltiples escenarios estocásticos y analizar en qué percentil las duraciones reales (finales) de las actividades han recaído y utilizar estos resultados para mediar en la negociación de compensación entre contratistas y clientes.

La herramienta también tiene limitaciones. Se ha requerido de una base de datos relativamente densa de estaciones para haber podido calcular los mapas de K , A y ϕ . Esto no es un problema en Reino Unido, pero no todos los países del mundo cuentan con dicha densidad de estaciones y con semejante histórico de información. Las mediciones de las estaciones también se realizan a 10 metros del suelo y en el ámbito terrestre. Esto quiere decir que los mapas elaborados podrían no ser en absoluto representativos de las condiciones meteorológicas encontradas durante la ejecución de edificios altos o en áreas sobre el agua (lagos, estuarios, costas, etc.). No obstante, la presente herramienta presenta una contribución notable para una gran cantidad de proyectos que sí se ejecutan en tierra y a una distancia del suelo relativamente reducida (menor de 50 metros).

6. Conclusiones

Los proyectos de construcción incluyen múltiples actividades sensibles a las condiciones meteorológicas. La sensibilidad meteorológica de las actividades varía acorde a la naturaleza de cada actividad, la ubicación donde se vayan a ejecutar, así como el momento del año en que se desarrollen. Adicionalmente, diferentes actividades son susceptibles a diferentes combinaciones de variables meteorológicas e intensidades de las mismas.

La investigación cuantitativa que se ha centrado en la influencia de la meteorología en la productividad de proyectos de construcción es bastante limitada, tiene predominantemente menos de diez años y se ha focalizado principalmente en proyectos de edificación. El principal objetivo de esta comunicación ha sido el de proponer un método que permitiera a los directores de proyectos de construcción el planificar proyectos a medio y largo plazo (con un horizonte de tiempo superior a dos semanas) considerando la influencia de la meteorología. El método propuesto no está limitado a un número ni tipología reducida de actividades, así como tampoco a áreas geográficas de limitada extensión a diferencia de trabajos previos.

La mayor contribución de esta investigación ha sido el desarrollo de una serie de expresiones senoidales que modelizan las probabilidades de que un día sea trabajable según el tipo de actividad y su ubicación. Estas expresiones permiten anticipar cuánto más tiempo cualquier actividad del proyecto se extenderá como consecuencia de la climatología. Los cálculos propuestos pueden cubrir todos los días del año y, por medio de seleccionar las combinaciones de variables meteorológicas apropiadas, pueden ser definidas para cualquier

otro tipo de actividades. Adicionalmente, las expresiones senoidales propuestas pueden ser implementadas con uno, dos o tres parámetros en función del grado de precisión requerido.

La mayoría de proyectos de construcción se componen de cientos (a veces miles) de actividades meteorológicamente susceptibles las cuales interactúan por medio de una red de precedencias. Determinar la sensibilidad al clima de todo el proyecto requiere combinar los potenciales impactos sobre cada actividad de la meteorología a lo largo de toda su ejecución. Un ejemplo de dicho cálculo ha sido desarrollado en esta comunicación por medio de un caso de estudio de la construcción de un edificio simplificado en el Reino Unido. Algunas ideas para futuras investigaciones y aplicaciones han sido comentadas en las discusiones. Finalmente algunas limitaciones del método han sido también destacadas.

Referencias

- Alaghbari, W., Kadir, M. R. A., Salim, A., & Ernawati. (2007). The significant factors causing delay of building construction projects in Malaysia. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 14(2), 192–206.
- Alarcón, L. F., Diethelm, S., Rojo, O., & Calderon, R. (2005). Assessing the impacts of implementing lean construction. *Proc., Int. Group for Lean Construction Annual Conf., Group for Lean Construction. Sydney, Australia* (pp. 387–393).
- Ballesteros-Pérez, P., Campo-hitschfeld, M. L., González-naranjo, M. A., & González-cruz, M. C. (2015). Climate and construction delays: case study in Chile. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 22(6), 596–621.
- Ballesteros-Pérez, P., Rojas-Céspedes, Y. A., Hughes, W., Kabiri, S., Pellicer, E., Mora-Melià, D., & del Campo-Hitschfeld, M. L. (2017). Weather-wise: A weather-aware planning tool for improving construction productivity and dealing with claims. *Automation in Construction*, 84, 81–95.
- El-Rayes, K., & Moselhi, O. (2001). Impact of Rainfall on the Productivity of Highway Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(2), 125–131.
- Jung, M., Park, M., Lee, H.-S., & Kim, H. (2016). Weather-Delay Simulation Model Based on Vertical Weather Profile for High-Rise Building Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 4016007.
- Kim, S. H., & Augenbroe, G. (2012). Using the National Digital Forecast Database for model-based building controls. *Automation in Construction*, 27, 170–182.
- Orangi, A., Palaneeswaran, E., & Wilson, J. (2011). Exploring Delays in Victoria-Based Australian Pipeline Projects. *Procedia Engineering*, 14, 874–881.
- Rogalska, M., Czarnigowska, A., Hejducki, Z., & Nahurny, T. O. (2006). Methods of estimation of building processes duration including weather risk factors (in Polish). *Building Review*, 1, 37–42.
- Tanijiri, H., Ishiguro, B., Arai, T., Yoshitake, R., Kato, M., Morishima, Y., & Takasaki, N. (1997). Development of automated weather-unaffected building construction system. *Automation in construction*, 6(3), 215–227.
- Thorpe, D., & Karan, E. P. (2008). Method for calculating schedule delay considering weather conditions. *Proceedings 24th Annual ARCOM Conference, 13 September 2008, Cardiff, UK* (pp. 809–818).
- Tian, W., & De Wilde, P. (2011). Uncertainty and sensitivity analysis of building performance using probabilistic climate projections: A UK case study. *Automation in Construction*, 20(8), 1096–1109.

Agradecimientos

Esta investigación fue apoyada por el fondo Bowen Jenkins Legacy Fund del Chartered Institute of Building (CIOB) de Reino Unido (referencia BLJ2016/BJL.01) y por el Natural Environment Research Council (NERC) bajo el programa Environmental Risks to Infrastructure Innovation Programme (referencia NE/R008876/1) en la Loughborough University. Los datos climatológicos fueron proporcionados por la UK Met Office.