

CLIMATE INFLUENCE ON CONSTRUCTION PRODUCTIVITY AND PROJECT DURATION. CASE STUDY IN CHILE

Ballesteros Pérez, Pablo ¹; Del Campo Hitschfeld, María Luisa ²; González Naranjo, Manuel Alejandro ²; González-Cruz, M^a Carmen ³; Pellicer, Eugenio ³

¹ University of Reading, ² Universidad de Talca, ³ Universitat Politècnica de València

Constant exposure to adverse weather conditions in civil work projects generates, in most cases, unavoidable delays during the execution phase. Therefore, activity planning and time management at an early stage will always be advisable when estimating the future project duration. However, little research addressing has been made quantifying the productivity loss due to the effect of weather in construction works.

To address this problem, a case study applied in Chile shows the project duration extension suffered on a series of six similar reinforced concrete bridge construction projects. This study, involves the application of a simple method based on climate performance reduction coefficients generated for each construction activity and show how the latter are influenced by weather. In addition, for the sake of clarity a series of isocurve maps depicting the expected average productivity loss are presented.

Keywords: climatology; productivity; delay; performance; bridge; Chile

INFLUENCIA DE LA CLIMATOLOGÍA EN LA PRODUCTIVIDAD Y DURACIÓN DE LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN. CASO DE ESTUDIO EN CHILE

La constante exposición a las condiciones climáticas adversas que sufren los proyectos de obra civil genera en la gran mayoría de los casos muchos retrasos que son lamentablemente ineludibles para la planificación de las obras. Por tanto, la gestión del tiempo y la planificación de las actividades en una fase inicial siempre serán una ventaja considerable al momento de estimar la duración del futuro proyecto. Sin embargo y aun así, son escasas las investigaciones que abordan y cuantifican las pérdidas de productividad por efecto del clima en las obras de construcción de forma objetiva.

Para hacer frente a esta problemática, un estudio de caso aplicado al país de Chile muestra la extensión en el tiempo que sufren seis proyectos de construcción de puentes similares con estructura de hormigón armado. Dicho estudio, implica de la aplicación de una metodología sencilla en base a coeficientes climáticos de reducción generados para cada una de las actividades de construcción que se ven influenciadas por el clima. Además, para una mejor interpretación de los coeficientes climáticos de reducción se presentan una serie de mapas de isocurvas que representan la pérdida de productividad promedio esperada.

Palabras clave: climatología; productividad; retraso; rendimiento; puente; Chile

Correspondencia: Pablo Ballesteros Pérez - pablo.ballesteros.perez@gmail.com;
p.ballesteros@reading.ac.uk

Agradecimientos: Esta investigación fue financiada en Chile por CONICYT bajo el programa FONDEF IDeA 2 etapas (proyecto número ID14110026).

1. Introducción

Es un aspecto bien conocido que la susceptibilidad de los procesos de construcción a las condiciones climáticas adversas puede ocasionar retrasos y pérdidas financieras (Alaghbari et al, 2007; Pewdum, Wichan Rujirayanyong y Sooksatra, 2009), no siendo extraño corroborar en la práctica habitual como estas condiciones climáticas adversas pueden ralentizar un trabajo considerablemente o incluso forzarlo a detenerse completamente (Dytczak et al, 2013; Mahamid, 2013). Sin embargo, esta influencia es muy variable ya que depende de la ubicación exacta del proyecto (Jang et al., 2008) y del momento durante el cual el trabajo se lleva a cabo (Othman et al., 2006).

Las causas y efectos de los factores de retraso en la industria de la construcción varían de país a país, debido a las limitaciones ambientales, topográficas y tecnológicas. Así, en resguardo de los efectos de la globalización y la diferencia tecnológica entre países en desarrollo y desarrollados, es necesario identificar las verdaderas razones de demora con el fin de reducir el impacto del retraso en cualquier obra de construcción (Shebob et al., 2012).

Desde este momento se hace necesario definir el concepto de "retraso". En el contexto de la gestión de la construcción Mubarak (2010) define retraso como "un acontecimiento o una condición que trae como consecuencia el terminar el proyecto más tarde de lo estipulado en el contrato" y en el estudio de Assaf y Al-Hejji (2006), un retraso de construcción fue definido como "el tiempo, ya sea invadido más allá de la fecha de finalización especificada en el contrato, o más allá de la fecha en que las partes acuerden la entrega de un proyecto". Sin embargo, ninguna de las definiciones anteriores es lo suficientemente completa ya que el retraso de una actividad no necesariamente influye en la fecha de término del proyecto. De este modo, Callahan et al. (1992) definen retraso como "el tiempo durante el cual una parte del proyecto de construcción se ha extendido o no ejecutado debido a un evento inesperado". Entonces, en el contexto de la presente investigación, esta definición de retraso es mucho más certera a nivel de actividades que de la duración total del proyecto.

Volviendo al aspecto climatológico de la investigación, ya hace algunas décadas se destacaba que el impacto del tiempo es uno de los principales factores causando retardo y sobrecostos en los proyectos de construcción (Baldwin et al 1971; Koehn y Meilhede 1981; Laufer y Cohenca 1990). Por ejemplo, no resultan extrañas las declaraciones para una gran cantidad de contratistas: "las condiciones climáticas son muy difíciles de predecir y planificar de antemano" (Sun y Meng, 2009); "las predicciones meteorológicas se ven afectadas por la incertidumbre" (Jones, 2001); o incluso "los retrasos como consecuencia de las condiciones meteorológicas son [...] los factores de riesgo importantes en el proceso de entrega del contrato [...] pero los gerentes de construcción son a menudo incapaces de predecir con fiabilidad los retrasos como consecuencia de ellos" (Thorpe y Karan, 2008). Por este motivo, no debe parecer extraño que el clima y las condiciones meteorológicas se presenten a menudo como una de las principales causas de cambios no programados en los proyectos (El-Rayes y Moselhi, 2001; Orangi et al, 2011) sirviendo como pretexto (a veces justificadamente y otras veces no) para reclamaciones posteriores generadas por el contratista (Yogeswaran et al., 1998).

A este respecto, un trabajo reciente de Nguyen et al. (2010), en relación a condiciones meteorológicas adversas, clasifica los siete factores que generalmente causan conflicto entre el contratista y el órgano de contratación en proyectos que sufren demoras. De esta forma, estos siete factores incluyen la definición de lo que se considera un clima normal, los umbrales del clima, el tipo de trabajo realizado, el número de días en que persiste el clima adverso, los criterios para considerar los días efectivamente perdidos, los días de retraso debido a la pérdida de productividad y los días perdidos en comparación con los días de trabajo en el calendario. Sin embargo, los mismos autores afirman que "la investigación futura puede

proporcionar un mecanismo adecuado para el análisis de días de retraso equivalentes por la pérdida de productividad" (Nguyen et al., 2010).

Con el desarrollo de esta investigación, se busca precisamente proporcionar unos lineamientos sobre los grados de variación en la productividad de diferentes actividades de construcción en relación al clima y cómo éstos pueden afectar los plazos de ejecución de los proyectos, particularmente en el caso de puentes de hormigón armado. Para esto se realizará un estudio de caso en Chile tomando datos acerca de seis puentes que se ejecutaron en dos regiones de este país, así como datos provenientes de la Dirección Meteorológica de Chile por medio de los cuales se obtendrán unos mapas de isolíneas de pérdida de productividad aplicables a cualquier otra obra de construcción que comparta actividades similares.

2. Estado del arte

Los agentes climáticos más comúnmente nombrados como fuentes de desviaciones significativas del proyecto en relación a la programación de referencia incluyen el frío extremo, las precipitaciones, el calor, el viento y la nieve (Migon, 2006; Choi y Hartley, 1996; David et al, 2010; Rogalska et al, 2006; Shahin et al, 2010, 2013; Thomas et al, 1999). Sin embargo, los efectos de los agentes climáticos sobre retrasos en los proyectos generalmente se quedan fuera de la corriente principal del clima y la investigación de la construcción.

En consecuencia, la investigación sobre la aplicación de los métodos en que se cruzan las variables climáticas y el rendimiento de las actividades de construcción son escasos, con tan sólo unas pocas excepciones.

Específicamente, en relación a la influencia de las precipitaciones, El-Rayes y Moselhi (2001) desarrollaron un sistema de ayuda a la decisión para la cuantificación del impacto de las precipitaciones en la productividad y duración de las operaciones de construcción de carreteras. De igual forma, Marzouk y Hamdy (2013) cuantificaron las pérdidas de productividad y los efectos del clima sobre las operaciones de encofrado mediante el uso de modelos dinámicos de lógica difusa en base a datos de precipitaciones y temperatura.

Por otra parte, las investigaciones que se refieren al impacto de las temperaturas suficientemente altas y bajas que afectan la productividad en las actividades de construcción, tampoco suelen ser abundantes, no obstante, Koehn y Brown (1985) establecen que es difícil lograr operaciones de construcción eficientes por debajo de $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ y por encima de $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ mediante el análisis de actividades de excavación, montaje, albañilería, carpintería, entre otras. En la misma línea, Shahin et al (2010, 2013) crearon un marco que permite a los usuarios simular actividades de construcción de tuberías analizando bajas temperaturas.

La adversidad del viento, en tanto, ocasiona la suspensión de los trabajos en andamios y grúas torre cuando se alcanza una velocidad de 50 km/h y 70 km/h, respectivamente (INSHT, 2000, 2004). Así, evidentemente, la pérdida de productividad es notoria en aquellos días donde la velocidad del viento es la señalada.

En cuanto a las nevadas, muchos estudios en el área de la construcción evalúan las cargas que generan las intensas caídas de nieve en estructuras (Meløysund et al, 2006; Kozak y Liel, 2015). Sin embargo, dichos trabajos no entregan información alguna sobre las dificultades que se presentan en los procesos constructivos. A pesar de esto, Thomas et al. (1999) determinaron que la nieve genera el 41% de la pérdida de productividad en las estructuras de acero, analizando distintos procesos de erigir acero en condiciones climáticas adversas.

En relación a los primeros Códigos técnicos que abordaron la influencia climática tenemos un primer ejemplo que se introdujo precisamente en España en el año 1964, cuando el Ministerio de Obras Públicas publicó "Los datos climáticos para carreteras" para ayudar a los gerentes de construcción a planificar con precisión la extensión de algunas actividades de trabajo

debido al mal tiempo (MOP, 1964). Varios años más tarde, la National Cooperative Highway Research Program lanzó una publicación sobre los efectos del clima en la construcción de carreteras (NCHRP, 1978). A raíz de esta publicación del año 1978, varios otros organismos públicos desarrollaron procedimientos internos para dar cuenta de las influencias del clima de alguna manera. Sin embargo, Hinze y Couey (1989) demostraron la falta de coherencia de los métodos utilizados, al menos con respecto a la industria de la construcción.

Finalmente, aparte de otros estudios y normativas que consideran semi-cuantitativamente los efectos del clima en las actividades de construcción (por ejemplo, (Jang et al, 2008; Thorpe y Karan, 2008)), prácticamente sólo un estudio se ha centrado en el desarrollo de un método para la estimación de un número razonable de días no laborales debido a eventos relacionados con el clima. Este estudio se basa en el uso de un generador estocástico de condiciones climáticas (Apipattanavis et al., 2010) aunque la influencia de cada escenario climatológico en relación al retraso específico sobre cada tipo de actividad de construcción no queda suficientemente definido. Por lo tanto, considerando la revisión de literatura existente y de acuerdo a la información recopilada, no existe hasta ahora un estudio que determine el número de días perdidos por la influencia de las condiciones climáticas en las actividades de construcción lo que justifica el objetivo de este trabajo, el cual será aplicado a actividades de construcción de puentes de hormigón armado de luces cortas.

3. Efectos del clima sobre unidades de obra más comunes

3.1 Descripción general

Considerando que en el marco teórico anterior se ha demostrado que las condiciones meteorológicas efectivamente afectan la productividad de las actividades de construcción produciendo retrasos, queda claro entonces que los datos meteorológicos deberían tomarse en cuenta en la fase de planificación de los proyectos (Jang et al., 2008). Por lo tanto, el presente método busca determinar el aumento de la duración de las actividades de construcción en función de una posible y futura climatología adversa, que va a depender del momento y lugar donde se desarrollen los trabajos.

Para empezar, se deberá recuperar la información meteorológica de la zona en estudio y analizar cómo afectan los eventos climáticos a las actividades de construcción. Así, como el estudio se realizará en Chile, los datos climáticos se obtendrán de la DMC (Dirección Meteorológica de Chile), que dispone de una publicación anual en la que se reflejan los valores totales y/o promedio (según el caso) mensuales de una serie de variables climáticas de interés para el presente estudio. Concretamente se han utilizado datos del período de 2003-2012 (DMC, 2004-2013), datos que pueden ser consultados gratuitamente en la web oficial de la DMC. Considerando lo anterior, estudios similares han utilizado períodos de análisis de 5 años (White et al, 2010) y 30 años (Jang et al, 2008), por lo que el período en cuestión (10 años) se considera apropiado.

No obstante, como es de esperar, algunas de las actividades de construcción en un proyecto de edificación están expuestas directamente a los eventos climáticos y otras no. Por ejemplo, el hormigonado de un muro estructural siempre estará expuesto al contacto directo con las precipitaciones si éstas se dan en ese momento. Sin embargo, actividades como la instalación de artefactos, colocación de señalética y muchas otras obras de terminación varias, es menos común que estén influenciadas por algún evento climático ya que en ocasiones están protegidas por la misma estructura o simplemente son extremadamente breves de ejecutar. Así, con un ánimo de generalizar esta primera aproximación, la gran mayoría de las actividades que se verán afectadas por el clima son desarrolladas en el exterior.

Otro punto a tomar en cuenta para el desarrollo del estudio y quizás el más relevante, es que resulta muy difícil establecer límites de intensidad para los cuales efectivamente no se puede

desarrollar una actividad de construcción. Particularmente, 10 mm de precipitación son suficientes para suspender el movimiento de tierra en un suelo arcilloso, lo que no sucedería en un suelo arenoso o con cantidades significativas de grava. Al mismo tiempo, factores como el tipo de maquinaria utilizada, el funcionamiento del sistema de drenaje, la radiación solar, entre otros, pueden afectar al momento de decidir qué cantidad de precipitación caída impide el desarrollo del trabajo (Ballesteros-Pérez et al., 2015). Entonces, es complejo establecer umbrales fijos para los cuales una actividad de construcción no se puede ejecutar con normalidad, debido a que existen muchos factores que se combinan y muchos de ellos no se conocen hasta el mismo momento de desarrollar la actividad. Aun así, este problema no debería impedir mejorar la situación actual a la que se ven expuestos los encargados de la planificación de proyectos ya que rara vez consideran las consecuencias del clima adverso. Por tanto, el objetivo es determinar umbrales generales para cada uno de los eventos climáticos y establecer combinaciones que afecten a las actividades de un proyecto.

Por último, para simplificar el estudio y facilitar su comprensión sólo se analizarán las actividades de construcción que forman parte de un puente de hormigón, considerando a efectos de la presente comunicación, una representación abreviada de todas las actividades que tienen lugar durante su construcción.

3.2 Coeficientes Climáticos Puros (CCP)

Los anuarios climatológicos de la DMC cuentan con una gran cantidad de datos que se pueden exportar fácilmente para realizar los cálculos. Desde allí, se escogieron los datos de cuatro variables climáticas que poseen registro desde enero a diciembre en cada uno de los años de registro. Las variables climáticas son:

- Número medio mensual de días de temperatura mínima $\leq 0^{\circ}$ C.
- Número medio mensual de días de precipitación ≥ 1 mm.
- Número medio mensual de días de precipitación ≥ 10 mm.
- Número medio mensual de días de velocidad del viento ≥ 9 nudos.

Si bien, se podría recuperar aún más información del clima, por ejemplo acerca de la precipitación de nieve y de la ocurrencia de tormentas eléctricas, en este caso particular, ambos eventos han sido descartados porque en Chile la nieve se registra como precipitación mientras que no existen registros que diferencien tormentas comunes de tormentas eléctricas (probablemente porque estas últimas son extraordinariamente raras en cualquier parte del país). Por último, en relación a otros múltiples factores, es necesario destacar que el método se basa en su simplicidad y el desarrollo de cálculos rápidos y sencillos, por lo que se considera que la información recogida es suficiente para un primer estudio.

En relación a la cantidad y tipología de estaciones meteorológicas que fueron utilizadas para el estudio se indica que de las 32 estaciones existentes en Chile, únicamente 24 fueron finalmente utilizadas siguiendo estos dos criterios: que tuvieran un histórico de al menos 3 años de datos y que pertenecieran al Chile continental (el territorio antártico e Isla de Pascua, así como otras islas, fueron descartadas).

En síntesis, con el número medio mensual de días para cada una de las variables climáticas escogidas y con las 24 estaciones meteorológicas definidas, se calcularon los Coeficientes Climáticos Puros (CCP) para los 12 meses del año basándose en el registro de 10 años que proporciona la DMC. La forma de realizar los cálculos fue la siguiente:

CCP de temperatura mínima $\leq 0^\circ \text{C}$

$$C_{t0} = 1 - \frac{\text{Número medio mensual de días de temperatura mínima } \leq 0^\circ \text{C}}{\text{Número de días del mes}} \quad (1)$$

CCP de precipitación $\geq 1 \text{ mm}$

$$C_{p1} = 1 - \frac{\text{Número medio mensual de días de precipitación } \geq 1 \text{ mm}}{\text{Número de días del mes}} \quad (2)$$

CCP de precipitación $\geq 10 \text{ mm}$

$$C_{p10} = 1 - \frac{\text{Número medio mensual de días de precipitación } \geq 10 \text{ mm}}{\text{Número de días del mes}} \quad (3)$$

CCP de velocidad del viento $\geq 9 \text{ nudos}$

$$C_v = 1 - \frac{\text{Número medio mensual de días con velocidad del viento } \geq 9 \text{ nudos}}{\text{Número de días del mes}} \quad (4)$$

Por tanto, para cada uno de los 12 meses de los 10 años de cada una de las 24 estaciones, se calcularon estos cuatro coeficientes, y posteriormente se obtuvo la media aritmética de cada mes y el promedio anual.

Respecto la decisión de utilizar estos valores umbral concretos (0°C , 1 y 10 mm, 9 nudos) se basó en que los anuarios, como es lógico, proveen información abreviada y generalmente procesada en escalones de valores comunes. Por ejemplo 1mm permite diferenciar un día en el que se considera que llovió de uno en el que no. No obstante, en el caso concreto de los 9 nudos (sobre 17 km/h) este valor será justificado más adelante.

3.3 Coeficientes Climáticos de Reducción (CCR)

Los CCP por si solos no representan mucha ayuda al momento de estimar la pérdida de productividad de una actividad de construcción. En cambio, si se toma una unidad de obra y se le asocia una combinación de CCP que afecte especialmente a dicha actividad, se facilitará enormemente la toma de decisión de la estimación de su demora considerando el impacto de la climatología. Por esta razón, se han escogido 4 actividades de construcción para las cuales los Coeficientes Climáticos de Reducción (CCR) se calcularon como sigue:

3.3.1 Movimientos de tierra (M)

Actividad asociada tanto a excavaciones como rellenos. Se ve afectada principalmente por variables climáticas como las precipitaciones (que dificultan el rendimiento de la actividad y aumentan la humedad del suelo para efectos de compactación) y el frío extremo que genera suelos congelados (Shahin et al, 2010, 2013; Apipattanavis et al., 2010). No obstante, como el territorio continental chileno “poblado” no cuenta con suelos congelados no se considera esta última variable. Por lo tanto, el CCR para la presente actividad su CCR se calculó como:

$$M = C_{p10} \quad (5)$$

3.3.2 Encofrados (E)

Marzouk y Hamdy (2013) estudiaron recientemente las actividades de encofrado incluyendo variables climáticas como las precipitaciones y temperatura, pero aplicados a trabajos de zanjas y tuberías profundas. Sin embargo, los autores aplican un método bastante complejo en base a un análisis de modelos de lógica difusa y aquí se presenta uno mucho más simple.

La única limitación es la velocidad del viento para utilizar grúas torres. La Norma Chilena n°2437 establece que las grúas torre solo pueden trabajar hasta una velocidad máxima del viento de 64 km/hr. Al existir una velocidad mayor a la indicada, se deben paralizar todas las tareas relacionadas y posicionar la grúa en veleta (misma dirección del viento dominante). No obstante, particularmente a los encofrados suspendidos en algún cable durante su colocación,

utilizando el mayor valor de la densidad del aire ($\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$) y un peso de encofrado de 28 kg/m^2 , obtenemos que la velocidad necesaria para inclinar un encofrado a 30° es de alrededor de $4,66 \text{ m/s}$ (equivalentes a $16,78 \text{ km/hr}$ o a $9,06$ nudos). En conclusión, para los cálculos correspondientes a los coeficientes de reducción de encofrados, utilizaremos únicamente esta variable con una velocidad umbral de 9 nudos.

$$E = C_v \quad (6)$$

3.3.3 Hormigón (H)

Son varios los eventos climáticos que pueden dañar el hormigón al momento de su colocación y posterior curado. Sin embargo, son 2 los eventos climáticos que causan un daño importante en su durabilidad y resistencia.

Un metro cúbico de hormigón en promedio necesita 130 litros de agua de amasado y las precipitaciones por encima de los 10 mm generan una cantidad adicional de agua en la superficie de 10 lts/m^2 . La cifra anterior, es absolutamente suficiente para disminuir en un 10% la resistencia a la compresión del hormigón en la mayoría de los casos de acuerdo con lo dicho por Jiménez et al. (2001) especialmente cuando el espesor vertical del elemento de hormigón es inferior a 1 metro.

Ahora bien, según el American Concrete Institute (ACI, 1985) el hormigón se expande y crea micro-fisuras cuando el agua se congela (por debajo de los 0° C), acelerando el deterioro a corto plazo. De aquí, obviamente también se desprende que esté restringido el hormigonado con presencia de bajas temperaturas. Por lo tanto, el CCR de la actividad Hormigón se calculó como sigue:

$$H = C_{t0} \times C_{p10} \quad (7)$$

3.3.4 Mezclas asfálticas (A)

La temperatura ambiente y la presencia indeada de agua juega un papel muy importante en la manipulación y trabajabilidad de este tipo de materiales.

Debe tenerse presente que los asfaltos son mezclas, conformadas por la combinación de agregados pétreos y ligantes asfálticos, los cuales se calientan para obtener una buena adherencia. Las mezclas asfálticas forman un elemento termoplástico, teniendo un comportamiento líquido cuando se calienta o gel sólido cuando se enfría. Al entrar en contacto con elevadas temperaturas, tienden a disminuir la viscosidad (propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo, por lo tanto es más manipulable). Con esto queda manifestado que la viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura.

Cuando las mezclas están en contacto con la temperatura ambiente, la viscosidad de ella aumenta, dificultando las operaciones de manipulación y compactación a las que son sometidas. La Dirección de Vialidad chilena establece, en este sentido, que no se pueden aplicar cuando las temperaturas mínimas sean menores que los 0° C o se corra el riesgo de que dicha temperatura se alcance en las siguientes horas tras su aplicación.

Por otro lado, el Manual de Carreteras, de la Dirección de Vialidad chilena, establece que las mezclas asfálticas no se pueden aplicar en presencia de agua (en este caso consideradas como precipitaciones leves, es decir de 1 mm). Esto se ve reflejado en que, al ser un compuesto orgánico constituido en su mayoría por hidrocarburos (moléculas de hidrógeno y carbono), tiende a oxidarse. También genera un fenómeno de espumado, producido por la ebullición del agua al entrar en contacto con las mezclas en caliente (temperatura sobre los 100° C). Todo lo anterior modifica la estructura química y composición de las mezclas, afectando la impermeabilidad y restando propiedades a este elemento. Por ende, el CCR es:

$$A = C_{t0} \times C_{p1} \quad (8)$$

Obviamente, existen otras unidades que podrían haber sido afectadas por la climatología, como por ejemplo el acero de armaduras, pero ante la inexistencia (o al menos no registro) de esta variable en el Chile continental, éstas fueron descartadas. Como se especificó anteriormente en múltiples ocasiones, este pretende ser un primer intento para mejorar la precisión de la planificación en obras de puentes de hormigón armado de vanos cortos.

De manera ilustrativa a como se desarrollaron los cálculos en las 24 estaciones meteorológicas, se realizarán todos los cálculos correspondientes a la estación de la ciudad de Curicó en la Tabla 1.

Tabla 1. Obtención de los CCP y CCR en la estación meteorológica de Curicó (Chile)

Datos base	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Total días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
Años estudio	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
Temp $\leq 0^{\circ}\text{C}$	0	0	0	4	31	31	75	48	7	0	0	0	
Pre $\geq 1\text{mm}$	6	3	7	18	43	87	64	71	22	29	11	11	
Pre $\geq 10\text{mm}$	2	1	2	7	21	49	23	32	7	10	4	1	
Vel ≥ 9 nud.	2	0	0	1	0	0	9	4	3	11	1	25	
CCP	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
C_{i0}	1,00	1,00	1,00	0,99	0,90	0,90	0,76	0,85	0,98	1,00	1,00	1,00	
C_{p1}	0,98	0,99	0,98	0,94	0,86	0,71	0,79	0,77	0,93	0,91	0,96	0,96	
C_{p10}	0,99	1,00	0,99	0,98	0,93	0,84	0,93	0,90	0,98	0,97	0,99	1,00	
C_v	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	0,99	1,00	0,97	
CCR	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
M	0,99	1,00	0,99	0,98	0,93	0,84	0,93	0,90	0,98	0,97	0,99	1,00	0,96
E	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	0,99	1,00	0,97	0,99
H	0,99	1,00	0,99	0,96	0,84	0,75	0,70	0,76	0,95	0,97	0,99	1,00	0,91
A	0,98	0,99	0,98	0,93	0,78	0,64	0,60	0,65	0,91	0,91	0,96	0,96	0,86

Posteriormente, para representar los CCR en todo el territorio del Chile continental se utilizó el programa SURFER que nos brinda un apoyo visual práctico y fácil de interpretar. Se confeccionaron 13 mapas para cada unidad de obra principal (uno para cada mes y otro para el promedio anual), es decir, 52 mapas, los cuales no han sido adjuntados a esta comunicación por razones de espacio. Estos mapas representan las principales ciudades de Chile, las cuales podrían tener una, dos, tres o hasta ninguna estación meteorológica.

4. Aplicación de la metodología. Caso de estudio

4.1 Construcción de un puente en Quilpué

Para el desarrollo de esta memoria se toma como referencia el proyecto denominado *Reposición Puente Quilpué, Región del Biobío* (ID: 5268-4-LP12, Mercado Público, 2012). El proyecto consta en realizar una estructura de 14 metros de longitud. En la Tabla 2 se indican el listado de actividades, sus unidades, cantidades, rendimientos aproximados de avance, duración estimada y el orden de ejecución de las tareas.

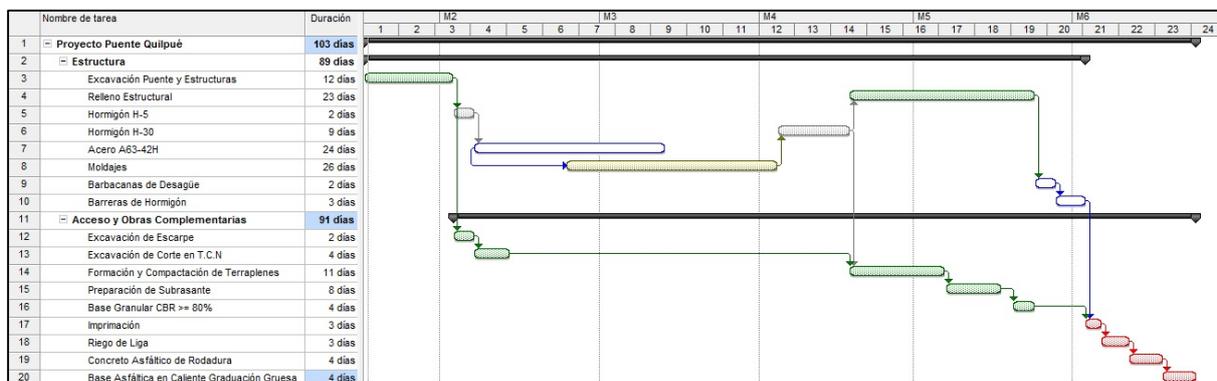
Tabla 2. Características principales del puente de hormigón armado analizado

EDP	Descripción	Ud	Cantidad	Rendim.	Duración	Prede-	CCR
1	Estructura						
1.1	Excav. gral. y estruct.	m ³	1.637	160	11	Inicio	M
1.2	Relleno estructural	m ³	1.710	80	22	1.4	M
1.3	Hormigón H-5	m ³	25	100	1	1.1	H
1.4	Hormigón H-30	m ³	594	80	8	1.6	H
1.5	Acero A63-42H	kg	71.280	3.000	24	1.3	-
1.6	Encofrados	m ²	1.299	50	26	1.5	E
1.7	Barbacanas desagüe	PA	1	0,5	2	1.2	-
1.8	Barreras de hormigón	ml	28	10	3	1.7	-
2	Acceso y obras complementarias						
2.1	Excavación Escarpe	m ³	150	160	1	1.1	M
2.2	Excavación de Corte	m ³	438	160	3	2.1	M
2.3	Form. y comp. terrap	m ²	1.824	200	10	1.4;2.2	M
2.4	Prepar. subrasante	m ²	1.520	250	7	2.3	M
2.5	Base Gran. CBR≥80%	m ²	369	150	3	2.4	M
2.6	Imprimación	m ²	1.538	1.000	2	1.8;2.5	A
2.7	Riego de Liga	m ²	1.200	1.000	2	2.6	A
2.8	Asfalto de rodadura	m ³	106	50	3	2.7	A
2.9	Base Asfált. g/Gruesa	m ³	108	50	3	2.8	A

Los rendimientos reflejados en la quinta columna fueron obtenidos por medio de una sucesión periódica de medidas de cada actividad cuando éstas estaban realmente ejecutándose, por lo que se consideran equivalentes a los rendimientos de ejecución sin influencia climática. Sin embargo la duración total de cada actividad era, casi siempre, generalmente mayor, porque había días en los que no se podía trabajar, en parte como consecuencia del clima.

Una vez conocidas las actividades del proyecto, la planificación queda expresada en la Figura 1, en este caso representada sin la influencia del clima. En general, dependiendo de la fecha exacta de inicio, este proyecto podría haber tenido una duración entre 135 a 137 días corridos en condiciones óptimas de clima. No obstante una vez considerado el clima por medio de los CCR (simplemente dividiendo la duración de cada actividad entre el CCP oportuno dependiendo del mes/es en que se ejecutara la actividad) la duración total del proyecto se incrementó a 148 días corridos aproximadamente.

Figura 1: Diagrama de Gantt de la construcción simplificada de un puente de hormigón armado



A modo de comprobación de que el planteamiento de esta metodología fue correcto, lo que se hizo fue efectuar una comparación de las duraciones reales finales de todas las actividades de este puente y de otros cinco ejecutados en las dos regiones inmediatamente inferiores (IX y X) contra las duraciones estimadas por medio de sus rendimientos sin influencia del clima prolongados por el efecto del clima, es decir por medio de considerar sus respectivos CCR en cada actividad según su naturaleza. Dicho análisis ocupa un espacio considerable y no ha podido ser reproducido en la presente comunicación pero, a modo de resumen, se explicita que, una vez ajustadas las duraciones de las actividades a un base común (para considerar los diferentes tamaños de cada puente) se disminuyó el error promedio de la estimación de la duración a un rango comprendido entre el 30% y el 88%, lo cual es un resultado bastante satisfactorio para una primera aproximación, dejando abierta la puerta para considerar un mayor número de efectos climáticos y/o para realizar un ajuste lineal en su influencia.

4.2 Comparación entre distintas localidades y periodos de ejecución.

Para finalizar el caso de estudio se realizó un análisis que, a efectos prácticos, se considera mucho más interesante que el estudio de un caso de un puente aislado. Este análisis consistió en observar cuánto habría durado el proyecto del anterior puente en caso de que se hubiera construido en cinco ubicaciones distintas de Chile y empezando su ejecución aproximadamente con el inicio de las cuatro estaciones del año. Concretamente, los comienzos de los proyectos se fijaron para el primer día del mes de enero, abril, julio y octubre y los lugares contrastados fueron Iquique, Rancagua, Curicó, Puerto Montt y Puerto Natales, es decir, desde la zona desértica del norte de Chile hasta la zona cercana a la antártida del sur del país. Los resultados principales de esta comparación se muestran en las Tablas 3 y 4.

Dentro del análisis comparativo entre las 5 localidades escogidas se puede observar que el aumento de los días planificados es distinto en cada punto, pero es notable como, aún cuando la localización de determinados proyectos no pueda ser normalmente modificada, las duraciones totales siguen evidenciando variaciones sensibles en función del momento del año en el que son ejecutados los proyectos para una misma localización.

Tabla 3. Resultados de las distintas duraciones de la construcción de un mismo puente frente al caso sin influencia del clima en cinco localizaciones y cuatro fechas de inicio distintas

Localización	Fecha de inicio	1 Enero	1 Abril	1 Julio	1 Octubre
Baseline sin clima	Fecha de término	15 May	14 Ago	14 Nov	12 Feb
	Duración total (días corridos)	135	136	137	135
Iquique	Fecha de término	1 Ago	29 Ago	2 Dic	11 Mar
	Duración total (días corridos)	213	151	155	162
Rancagua	Fecha de término	28 May	3 Sep	26 Nov	25 Feb
	Duración total (días corridos)	148	156	149	147
Curicó	Fecha de término	28 May	9 Sep	26 Nov	24 Feb
	Duración total (días corridos)	148	162	149	146
Puerto Montt	Fecha de término	27 Jun	14 Oct	22 Dic	6 Mar
	Duración total (días corridos)	178	197	175	157
Puerto Natales	Fecha de término	19 Ago	29 Oct	15 Ene	29 May
	Duración total (días corridos)	231	212	199	241

Tabla 4. Incrementos de la duración del puente de estudio frente al caso sin influencia del clima en cinco localizaciones distintas y con cinco fechas de inicio distintas

Mes de inicio	Enero	Abril	Julio	Octubre
Iquique	58%	11%	13%	20%
Rancagua	10%	15%	9%	9%
Curicó	10%	19%	9%	8%
Puerto Montt	32%	45%	28%	16%
Puerto Natales	71%	56%	45%	79%

5. Conclusiones

Los efectos climatológicos en el desarrollo de cualquier tipo de proyectos de construcción son frecuentemente citados como una de las principales causas en la demora de la entrega y recepción final de estos mismos. Por otra parte, es mínimo el número de investigaciones que han afrontado el análisis de la influencia del clima, más desde el punto de vista de conectar variables climáticas concretas con actividades específicas de la construcción.

Los resultados obtenidos en la investigación realizada forman un primer instrumento de ayuda para la planificación de cualquier tipo de proyecto, ya sean puentes, carreteras, pavimentos o cualquier otra tipología que implemente algunas de las unidades de obras estudiadas, pudiendo estimarse las duraciones reales de las tareas considerando el factor climático en la demora de las mismas.

Tras determinar las variables climáticas que restringen la ejecución de las partidas de construcción, se puede conocer los efectos producidos en cada una de ellas. Estos efectos pueden ser relacionados a la manipulación de algún material, variaciones en las propiedades físicas, químicas o mecánicas, aumento del peligro y/o imposibilidad para los trabajadores de realizar las faenas, poca calidad del producto en la entrega final, entre otros.

Se ha podido observar directamente cómo las variaciones de los tiempos programados en la construcción de puentes de hormigón armado pueden llegar a depender extraordinariamente del lugar donde se realizan los trabajos y del momento del año en que tienen lugar estos trabajos. La conclusión es lógica: si una administración pública debe pagar por la construcción de una infraestructura pública, obviamente realizar un primer análisis de cuándo la infraestructura será ejecutada en un tiempo menor sería de gran interés, ya que una menor duración implicaría seguramente menores costes y menores afecciones a la comunidad circundante. Desde el punto de vista del contratista, la metodología expuesta también presenta interés, ya que permite reasignar los recursos disponibles, generalmente escasos, para optimizar períodos de trabajo los más ininterrumpidos posible y el consecuente ahorro en múltiples desplazamiento de equipos y mano de obra de una actividad a otra.

Múltiples y futuras líneas de investigación se abren con este primer estudio. La primera opción de continuidad es evidente: desarrollar una metodología que mejore la precisión por medio de utilizar unidades de obra más detalladas y la incorporación de mayor cantidad de variables climáticas. La segunda, menos evidente, pero tal vez más interesante, es el desarrollo de una herramienta probabilística que permita conocer las probabilidades de demora de cada actividad en función exclusivamente del clima, con el objeto de mediar en las frecuentes disputas y reclamos de los contratistas a los promotores como consecuencia de haber sufrido una mala climatología durante la ejecución.

Referencias

- ACI, American Concrete Institute (1985), "Manual of Concrete Practice, part 1".
- Alaghbari, W. E., Razali A. Kadir, M., Salim, A., & Ernawati. (2007). The significant factors causing delay of building construction projects in Malaysia. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 14(2), 192-206.
- Apipattanavis, S., Sabol, K., Molenaar, K. R., Rajagopalan, B., Xi, Y., Blackard, B., & Patil, S. (2010). Integrated framework for quantifying and predicting weather-related highway construction delays. *Journal of Construction Eng. and Mngt.*, 136(11), 1160-1168.
- Assaf, S. A., & Al-Hejji, S. (2006). Causes of delay in large construction projects. *International Journal of Project Management*, 24(4), 349-357.
- Baldwin, J. R., Manthei, J. M., Rothbart, H., & Harris, R. B. (1971). Causes of delay in the construction industry. *Journal of the Construction Engrg. Division*, 97(2), 177-187.
- Ballesteros-Pérez, P., del Campo-Hitschfeld, M.L.; González-Naranjo, M., & González-Cruz, M.C. (2015), "Climate and construction delays: case study in Chile", *Engineering, Construction and Architectural Management*, 22(6), 596-621.
- Callahan, M. T., Quackenbush, D. G., & Rowings, J. E. (1992). *Construction project scheduling*.
- Choi, T. Y., & Hartley, J. L. (1996). An exploration of supplier selection practices across the supply chain. *Journal of operations management*, 14(4), 333-343.
- David, M., Adelard, L., Lauret, P., & Garde, F. (2010). A method to generate typical meteorological years from raw hourly climatic databases. *Building and Environment*, 45(7), 1722-1732.
- DMC, Dirección Meteorológica de Chile (2004-2013), "Anuarios Climatológicos 2003-2012", Santiago, disponible en: <http://164.77.222.61>
- Dytczak, M., Ginda, G., Szklennik, N., & Wojtkiewicz, T. (2013). Weather Influence-Aware Robust Construction Project Structure. *Procedia Engineering*, 57, 244-253.
- 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.
- Hinze, J., & Couey, J. (1989). Weather in construction contracts. *Journal of construction engineering and management*, 115(2), 270-283.
- INSHT, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene el Trabajo (2000), "NTP 701: Grúas-torre. Recomendaciones de seguridad en su manipulación".
- INSHT, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene el Trabajo (2004), "NTP 670: Andamios de trabajo prefabricados (II): montaje y utilización".
- Jang, M.H., Yoon, Y.S., Suh, S.W. & Ko, S.J. (2008), "Method of Using Weather Information for Support to Manage Building Construction Projects (ASCE)", *AEI 2008: Building Integration Solutions*, pp. M. Ettouney (Ed.), ASCE, 1-10.
- Jiménez, P., A., G. and Morán, F. (2001), *Hormigón armado*, p.14. Ed. Gustavo Gili. Barcelona.
- Jones, R. N. (2001). An environmental risk assessment/management framework for climate change impact assessments. *Natural hazards*, 23(2-3), 197-230.
- Koehn, E., & Brown, G. (1985). Climatic effects on construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 111(2), 129-137.
- Koehn, E., & Meilhede, D. (1981). Cold weather construction costs and accidents. *Journal of the Construction Division*, 107(4), 585-595.
- Kozak, D. L., & Liel, A. B. (2015). Reliability of steel roof structures under snow loads. *Structural Safety*, 54, 46-56.
- Laufer, A., & Cohenca, D. (1990). Factors affecting construction-planning outcomes. *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(1), 135-156.
- Mahamid, I. (2013). Contractor's perspective toward factors affecting labor productivity in building construction. *Engineering, Const. and Architectural Mngt.*, 20(5), 446-460.
- Marzouk, M., & Hamdy, A. (2013). Quantifying weather impact on formwork shuttering and removal operation using system dynamics. *KSCE Journal of Civil Eng.*, 17(4), 620-626.

- Meløysund, V., Lisø, K. R., Siem, J., & Apeland, K. (2006). Increased Snow Loads and Wind Actions on Existing Buildings: Reliability of the Norwegian Building Stock 1. *Journal of structural engineering*, 132(11), 1813-1820.
- Migon, P. (2006). Büdel, J. 1982: Climatic geomorphology. Princeton: Princeton University Press. (Translation of Klima-geomorphologie, Berlin-Stuttgart: Gebrüder Borntraeger, 1977.). *Progress in physical geography*, 30(1), 99-103.
- Dirección de Vialidad de Chile (2008), Manual de Carretera, Volumen 3: Instrucciones y Criterios de diseño, Ministerio de Obras Públicas, Santiago de Chile.
- MOP, Ministerio de Obras Púb. (1964), "Direc. General de Carret.. Datos climát. para Carret.". Mubarak, SA (2010). *Programación y Control de Proyectos de Construcción*. John Wiley & S.
- NCHRP, National Cooperative Highway Research Projects (1978), "Effect of weather on highway construction".
- Nguyen, L. D., Kneppers, J., García de Soto, B., & Ibbs, W. (2010). Analysis of adverse weather for excusable delays. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(12), 1258-1267.
- Norma Chilena Oficial, Nc. 2437 (1999), "Grúas Torre. Condiciones de Operación", Instituto Nacional de Normalización, Santiago.
- Orangi, A., Palaneeswaran, E., & Wilson, J. (2011). Exploring Delays in Victoria-Based Australian Pipeline Projects. *Procedia Engineering*, 14, 874-881.
- Othman, A.A., Torrance, J.V. & Hamid, M.A. (2006), "Factors influencing the construction time of civil engineering projects in Malaysia", *Engineering, Construction and Architectural Management*, Vol. 13 No. 5, pp. 481–501.
- Pewdum, W., Rujirayanyong, T., & Sooksatra, V. (2009). Forecasting final budget and duration of highway construction projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 16(6), 544-557.
- 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.
- Shahin, A., AbouRizk, S. M., & Mohamed, Y. (2010). Modeling weather-sensitive construction activity using simulation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(3), 238-246.
- Shahin, A., AbouRizk, S. M., Mohamed, Y., & Fernando, S. (2013). Simulation modeling of weather-sensitive tunnelling construction activities subject to cold weather. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(1), 48-55.
- Shebob, A., Dawood, N., Shah, R. K., & Xu, Q. (2012). Comparative study of delay factors in Libyan and the UK construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 19(6), 688-712.
- Sun, M., & Meng, X. (2009). Taxonomy for change causes and effects in construction projects. *International Journal of Project Management*, 27(6), 560-572.
- Thomas, H.R., Riley, D.R. & Sanvido, V.E. (1999), "Loss of Labor Productivity due to Delivery Methods and Weather", *Journal of Construction Engineering and Management*, American Society of Civil Engineers, 125(3), 39–46.
- Thorpe, D., & Karan, E. P. (2008). Method for calculating schedule delay considering weather conditions. In *Proceedings of the 24th Annual Conference of the Association of Researchers in Construction Management (ARCOM 2008)* 2, 809-818.
- White, P., Golden, J. S., Biligiri, K. P., & Kaloush, K. (2010). Modeling climate change impacts of pavement production and construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 776-782.
- Yogeeswaran, K., Kumaraswamy, M. M., & Miller, D. R. (1998). Claims for extensions of time in civil engineering projects. *Construction Management & Economics*, 16(3), 283-293.