

Trabajo Fin de Grado

Incorporación de una caracterización
direccional para la estimación detallada del
riesgo de penetración de humedad en fachadas
españolas.

Incorporation of a directional characterization
for detailed estimation of the risk of water
penetration in Spanish facades.

Autor/es

Marcos Martín Alcubierre

Director

José María Pérez Bella

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2018



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. MARCOS MARTÍN ALCUBIERRE,

con nº de DNI 18059471D en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
GRADO DE INGENIERÍA MECÁNICA, (Título del Trabajo)
INCORPORACIÓN DE UNA CARACTERIZACIÓN DIRECCIONAL PARA LA ESTIMACIÓN DETALLADA DEL RIESGO DE PENETRACIÓN DE HUMEDAD EN FACHADAS ESPAÑOLAS

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, a 20 de Septiembre de 2018

Fdo:

Incorporación de una caracterización direccional para la estimación detallada del riesgo de penetración de humedad en fachadas españolas

RESUMEN

La penetración de agua atmosférica en las fachadas de los edificios genera diversos síndromes que afectan a la durabilidad de los elementos constructivos y a su eficiencia energética, afectando también a la salud de las personas que los ocupan. Las soluciones constructivas que se proponen para limitar dicho problema se establecen a partir de un grado de impermeabilidad mínimo que deben cumplir, acorde al riesgo de penetración de humedad al que están expuestas.

La correcta estimación de la solicitud de humedad sobre estos cerramientos verticales resulta por tanto fundamental para determinar condiciones de diseño adecuadas para los mismos.

La definición del grado de impermeabilidad mínimo requerido a las fachadas en el territorio español se establece en la actualidad mediante el Código Técnico de la Edificación – Documento Básico HS1 Salubridad, a través del análisis de dos parámetros climatológicos: la pluviometría media anual y la velocidad básica del viento. Ambos parámetros presentan carencias teórico-técnicas suficientes como para plantearse si la estimación que actualmente realizan se corresponde con la exposición real.

En este proyecto se ha analizado, a partir de registros meteorológicos diarios, la estimación escalar y direccional detallada del riesgo de penetración de humedad en fachadas españolas utilizando procedimientos internacionalmente aceptados. Ellos se basan en dos parámetros distintos de los empleados en el Código Técnico de la Edificación: la lluvia batiente y la presión eólica simultánea a la lluvia, auténticos responsables de la penetración de humedad en los cerramientos. Ambos parámetros se han combinado además para obtener un índice de riesgo de penetración de agua (risk of water penetration o RIWP) que caracteriza la solicitud conjunta de las fachadas a ambos parámetros.

A partir de este análisis se han comparado los resultados obtenidos para los diversos emplazamientos utilizando el método vigente en el Código Técnico de la Edificación y los procedimientos internacionalmente aceptados para reflexionar sobre la prestación del código, discutiendo si debería plantearse un cambio en él.

Finalmente, se propone la utilización de dos mapas de exposición de España: el primero con valores de índice de lluvia batiente (driving rain index o DRI) y el segundo con valores de índice de presión eólica simultánea a la lluvia batiente (driving-rain wind pressure o DRWP) para facilitar la estimación, por parte del código, del grado de impermeabilidad mínimo exigido en las fachadas españolas en cualquier territorio del país (a excepción de Canarias) gracias a los resultados obtenidos en este proyecto para las comunidades autónomas de Andalucía, Aragón, Castilla y León, Cataluña, Galicia y Navarra y a los identificados en estudios anteriores en el resto de CCAA.

*Incorporación de una caracterización direccional
para la estimación detallada del riesgo de
penetración de humedad en fachadas españolas*

Tabla de contenidos

| | |
|---|----|
| 1.- Introducción | 6 |
| 2.- Objetivos | 10 |
| 3.- Alcance..... | 11 |
| 4.- Metodología | 14 |
| 4.1.- Determinación del aporte de agua recibido por los cerramientos verticales..... | 14 |
| 4.2.- Determinación de la presión eólica simultánea a la lluvia batiente | 16 |
| 4.3.- Determinación del índice de riesgo de penetración de agua | 17 |
| 4.4.- Cálculo de períodos de retorno..... | 18 |
| 5.- Resultados y discusión | 19 |
| 5.1.- Ficha de datos tipo de una estación meteorológica | 19 |
| 5.2.- Análisis de resultados del proyecto | 22 |
| 5.2.1.- Pluviometría e índice de lluvia batiente DRI | 22 |
| 5.2.2.- Velocidad media del viento, presión eólica e índice de exposición a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente DRWP..... | 26 |
| 5.2.3.- Lluvia batiente y presión eólica simultánea a la lluvia batiente..... | 31 |
| 5.2.4.- Grado de impermeabilidad e índice de riesgo de penetración de humedad RIWP | 31 |
| 5.3.- Mapas de exposición a la lluvia batiente y a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente de España | 33 |
| 5.3.1.- Mapa de exposición a la lluvia batiente | 34 |
| 5.3.2.- Mapa de exposición a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente..... | 36 |
| 5.3.3.- Comparación de los mapas de exposición obtenidos en este estudio con los previamente elaborados para España..... | 38 |
| 6.- Conclusiones | 42 |
| 7.- Bibliografía | 43 |

Anexos

- Anexo I: Tablas resumen de los resultados obtenidos en las estaciones meteorológicas, ordenadas por CCAA
- Anexo II: Mapas de exposición a la lluvia batiente mediante el índice daDRI y a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente mediante el índice dDRWP
- Anexo III: Fichas tipo de resultados de las estaciones estudiadas, ordenadas según Anexo I
- Anexo IV: Cálculo períodos de retorno aplicando el método de Gumbel
- Anexo V: Otra información gráfica

1.- Introducción

La penetración de agua atmosférica en los cerramientos verticales de los edificios y la presencia de humedad en el interior de los mismos afecta severamente en las construcciones, disminuyendo su vida útil, incrementando los costes energéticos y de mantenimiento del edificio o incluso llegando a damnificar la salud de sus ocupantes (alergias, proliferación de mohos...), contribuyendo a causar lesiones constructivas más graves que pueden conllevar un riesgo muy elevado para la edificación. [1-3]

La necesidad de limitar el riesgo de presencia inconveniente de agua o humedad en el interior de los edificios se introdujo por primera vez en España mediante una exigencia básica en el Código Técnico de la Edificación – Documento Básico HS1 Salubridad (CTE DB-HS1) [4], aprobado en 2006, suponiendo un gran avance en este campo, debido a la inexistencia de regulación previa. Para ello, este documento básico determina las condiciones de diseño que deben cumplir las fachadas de acuerdo a la solicitud por humedad atmosférica estimada sobre ellas, fijando un grado de impermeabilidad mínimo para estos cerramientos verticales. Por tanto, la correcta asignación de esta solicitud es un factor fundamental para asegurar una solución constructiva adecuada, optimizando su diseño y evitando posibles daños futuros.

La presencia de agua en estado líquido sobre las fachadas se debe principalmente a las precipitaciones atmosféricas. Sin embargo, la penetración de esta agua en las fachadas se debe esencialmente a la combinación simultánea de fenómenos de precipitación y de rachas viento. La presencia del viento modifica la trayectoria vertical natural de las gotas de agua mientras se producen las precipitaciones, siendo el responsable del aporte de agua líquida sobre los cerramientos verticales de los edificios, fenómeno denominado lluvia batiente (wind-driven rain o WDR) [5]. La presión eólica simultánea a la lluvia batiente sobre la fachada (driving rain wind pressure o DRWP) colabora definitivamente en la penetración del aporte de agua a través de los materiales de construcción.

Los procedimientos para una correcta estimación de la cantidad de lluvia batiente y de la presión eólica simultánea que reciben las fachadas de un edificio han sido el objeto de investigación de diversos estudios de campo y mediciones empíricas realizadas a lo largo de las últimas décadas, definiéndose distintas formulaciones a partir de datos climáticos simultáneos de intensidad de precipitación, velocidad y dirección del viento.

Estas formulaciones de cálculo de la lluvia batiente fueron normalizadas en el estándar internacional ISO 15927-3 [6], aprobado en 2009, el cual se encuentra inspirado en un estándar británico anterior [7]. La norma UNE-EN ISO 15927-3 [8], aprobada en 2011, es la encargada de transponer el estándar internacional mencionado al ámbito español. Desde la aprobación del estándar ISO 15927-3:2009, en el contexto internacional se utiliza comúnmente la relación WDR y DRWP (comentadas en detalle en el apartado 4), permitiendo, además, un estudio direccional en cada posible orientación de los cerramientos. No obstante, la implantación de este estándar internacional se ve condicionada en la mayoría de los países, entre ellos España, por la falta de los registros climatológicos horarios necesarios, recopilados en una gran cantidad de emplazamientos y con una antigüedad superior a 10 años (20 o 30 años de registros es lo recomendado por el estándar). Para suplir la carencia de estos datos climáticos horarios, se han desarrollado métodos internacionalmente reconocidos que estudian registros meteorológicos diarios adaptados a las particularidades de los datos disponibles.

A pesar de la aceptación universal de la necesidad del estudio de la lluvia batiente y de la presión eólica simultánea a la precipitación para estimar el riesgo de penetración de humedad en fachadas, el CTE DB-HS1 valora la solicitud por humedad pronosticada en las fachadas asignando un grado de impermeabilidad mínimo, del cual dependen las condiciones de diseños necesarias para hacer frente a cada solicitud, basándose en la pluviometría media anual y la velocidad básica del viento. Estos dos parámetros muestran motivos suficientes como para no ser fiables para definir convenientemente un grado de impermeabilidad mínimo y con él, el riesgo real de penetración de agua en la fachada.

Aplicando el Código Técnico de la Edificación, la pluviometría media anual se determina como la cantidad de agua atmosférica registrada sobre una superficie horizontal en el intervalo de un año, definiendo un nivel de exposición para cada emplazamiento a través de un mapa zonificado (zonas I-V) según datos pluviométricos recopilados por la AEMET entre 1971-2000.

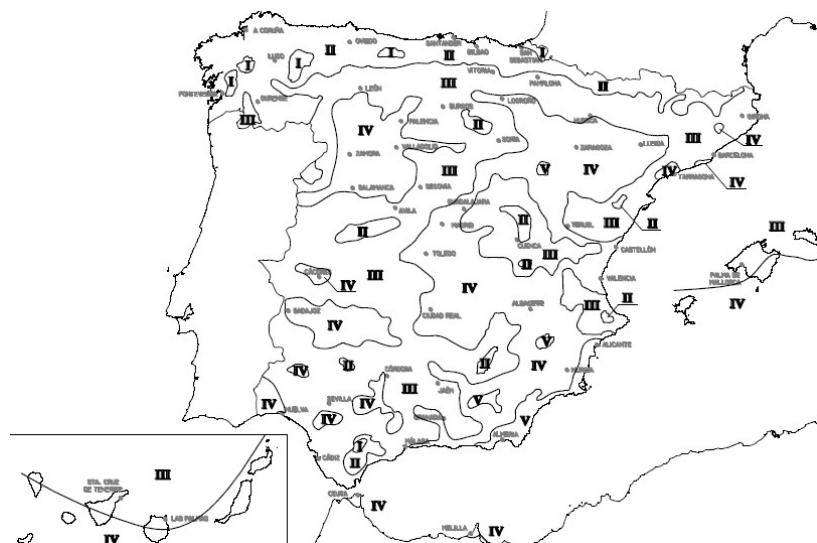


Figura 1.1.- Zonas pluviométricas de promedios en función del índice pluviométrico anual según CTE DB-HS1 2.3.1

Este parámetro no tiene en cuenta la acción del viento simultánea a la precipitación, siendo éste un factor imprescindible para el humedecimiento de las fachadas y, por tanto, no calcula la cantidad de agua que reciben estos cerramientos.

Según el CTE, la velocidad del viento básica hace referencia al valor de la velocidad del viento que registrado a lo largo de un tiempo de 10 minutos se espera que se supere de media una vez cada 50 años, es decir, el valor que se repite con un período de retorno de 50 años. Este factor también se asigna mediante un mapa dividido en zonas (zonas A-C) que combinado con la altura del edificio en metros ($\leq 15, 16 - 40$ y $41 - 100$) y su entorno (E0 zonas llanas y expuestas y E1 zonas urbanas, industriales y forestales) determinan el grado de exposición al viento (V1-V3) al que la fachada tiene que hacer frente.

Este grado de exposición al viento supone una caracterización cualitativa y no permite asociar un valor numérico a dicho grado, impidiendo comparar con exactitud la exposición a este fenómeno en diferentes emplazamientos u orientaciones en una misma ubicación.

*Incorporación de una caracterización direccional
para la estimación detallada del riesgo de
penetración de humedad en fachadas españolas*

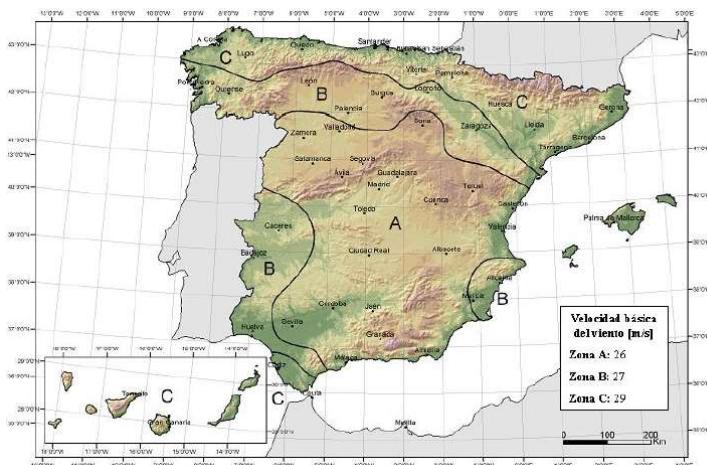


Figura 1.2.- Zonas eólicas según CTE DB-HS1 2.3.1

| | Clase del entorno del edificio | | | | | |
|---------------------|--------------------------------|----|----|-------------|----|----|
| | E1 | | | E0 | | |
| | Zona eólica | | | Zona eólica | | |
| | A | B | C | A | B | C |
| Altura del edificio | ≤ 15 | V3 | V3 | V3 | V2 | V2 |
| en m | 16 - 40 | V3 | V2 | V2 | V2 | V1 |
| | 41 - 100 ⁽¹⁾ | V2 | V2 | V1 | V1 | V1 |

⁽¹⁾ Para edificios de más de 100 m de altura y para aquellos que están próximos a un desnivel muy pronunciado, el grado de exposición al viento debe ser estudiada según lo dispuesto en el DB-SE-AE.

Figura 1.3.- Grado de exposición al viento según CTE DB-HS1 2.3.1

A pesar de que ninguno de los dos factores valora de forma precisa la exposición real a la humedad existente en los cerramientos verticales, los dos parámetros se combinan para caracterizar el riesgo de penetración de agua.

Además de los motivos citados en la descripción de cada parámetro estudiado por el CTE, existen más razones que invalidan el uso de la pluviometría media anual y el valor básico de velocidad de viento para una adecuada caracterización del riesgo de penetración de agua en la fachada. La pluviometría se promedia en el intervalo de un año, mientras que la velocidad básica del viento se refiere al valor máximo que se puede alcanzar en un tiempo de 10 minutos. Este último parámetro se representa por el valor máximo alcanzado en un período de retorno de 50 años, siendo, por tanto, un valor estadístico. Sin embargo, la pluviometría se cuantifica mediante un valor real promediado anualmente. Además, la velocidad básica del viento no valora la presión eólica simultánea a la lluvia batiente, por lo que no determina la influencia de la presión eólica en el proceso de penetración de agua en los cerramientos, siendo éste un factor de gran influencia en él.

Así pues, siendo la pluviometría media anual y la velocidad básica del viento dos parámetros climatológicos que no proporcionan ni la cantidad de agua atmosférica recibida por los cerramientos verticales de los edificios, ni la presión eólica simultánea a la lluvia batiente, el grado de impermeabilidad mínimo requerido para las fachadas puede resultar inadecuado, desencadenando la aplicación de soluciones constructivas para los cerramientos verticales que no se ajusten a la solicitud real existente, con los riesgos que esto conlleva.

| | | Zona pluviométrica de promedios | | | | |
|-------------------------------|----|---------------------------------|----|-----|----|---|
| | | I | II | III | IV | V |
| Grado de exposición al viento | V1 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| | V2 | 5 | 4 | 3 | 3 | 2 |
| | V3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |

Figura 1.4.- Grado de impermeabilidad mínimo exigido a las fachadas según CTE DB-HS1 2.3.1

Anteriormente en España, se han realizado dos estudios en este ámbito. El primero de ellos [1] logró una caracterización del grado de impermeabilidad adaptando la formulación del estándar 15927-3:2009 a los datos diarios disponibles en 80 emplazamientos a lo largo de todo el país. No obstante, el número de estaciones meteorológicas analizadas no es significativo para realizar una caracterización de todo el territorio español. En cualquier caso, este estudio permite hacerse una idea del déficit prestacional de la estimación del riesgo de penetración de humedad en las fachadas del territorio español, a pesar de que obvió la componente direccional de la lluvia batiente y de la presión eólica simultánea a la misma que sí se ha añadido en nuestro estudio.

El segundo [9] analizó los datos de 393 emplazamientos ubicados entre las comunidades autónomas de Andalucía, Cataluña y Galicia, siendo ésta una cantidad representativa de los mismos, mediante la aplicación de procedimientos reconocidos internacionalmente adaptados al tipo de datos recopilados. La inexistencia de registros diarios en las estaciones meteorológicas situadas en Cataluña y Galicia, contando únicamente con datos mensuales y anuales, obligó a los autores a recurrir también a cálculos estadísticos y mapas de viento para realizar una estimación completa de estas dos comunidades autónomas, obviando además, como el primer estudio, la componente direccional de los registros.

En este proyecto se ha llevado a cabo la implementación de las aproximaciones de cálculo de la lluvia batiente y de la presión eólica simultánea a la precipitación reconocidas internacionalmente en 343 estaciones meteorológicas situadas a lo largo de las CCAA de Andalucía, Aragón, Castilla y León, Cataluña, Galicia y Navarra y las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. Con ello, se ha querido mostrar la falta de prestación de la normativa española en esta materia, el desajuste del grado de impermeabilidad mínimo requerido para imposibilitar la penetración de agua en los cerramientos verticales conforme a la solicitud real en cada fachada y colaborar en la mejor asignación de las condiciones de diseño necesarias dependiendo de la orientación de las mismas.

A diferencia de los estudios citados anteriormente, el análisis de, exclusivamente, datos diarios ha permitido añadir una caracterización direccional a la estimación de solicitud de humedad de los cerramientos verticales, pudiendo así distinguir las distintas solicitudes no sólo entre diversos emplazamientos, sino también entre las distintas orientaciones de fachada en una misma ubicación.

Se han desarrollado nuevos mapas de exposición daDRI (daily-based annual driving rain index) y dDRWP (daily driving rain wind pressure) en el que se han añadido los resultados previamente identificados por otros TFG en otras comunidades autónomas, dando como resultado mapas completos de España (a excepción de Canarias) que podrían implementarse directamente en el CTE para ayudar a definir el grado de impermeabilidad mínimo de las fachadas de un edificio, permitiendo así estimar el riesgo de penetración de agua en las fachadas españolas de forma más adecuada y prestacional.

2.- Objetivos

El objetivo final de este proyecto es lograr una adecuada estimación de la solicitud por humedad prevista en las fachadas españolas, con el fin de adecuar y optimizar el diseño de las soluciones constructivas para estos cerramientos conforme a esta solicitud, consiguiendo limitar al máximo el riesgo que esto supone para los edificios y sus ocupantes. Para ello, se ha incorporado de forma novedosa en España, en concreto en las comunidades autónomas de Andalucía, Aragón, Castilla y León, Cataluña, Galicia y Navarra y las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, el estudio de la caracterización direccional de dicha estimación.

La elaboración de mapas de exposición a la lluvia batiente y a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente, evaluando las orientaciones de fachada de exposición predominante en cada zona, serán el resultado de este análisis.

A lo largo del proyecto, se pone de manifiesto el desacuerdo de la utilización de los criterios especificados en el Código Técnico de la Edificación, al considerar la pluviometría media anual y la velocidad básica del viento como únicos parámetros que definen el grado de impermeabilidad mínimo exigido a las fachadas.

De esta forma, la utilización de procedimientos internacionalmente aceptados de cálculo de índices de lluvia batiente y presión eólica simultánea a la lluvia batiente, que permiten calcular el índice de riesgo existente de penetración de agua en las fachadas, resulta primordial en el territorio español por varios motivos.

En primer lugar, permite estimar la solicitud real de humedad de los cerramientos verticales de los edificios, analizando los dos parámetros fundamentales en el riesgo de penetración de agua en ellos como son la lluvia batiente y la presión eólica simultánea a la precipitación.

Además, la comparación de los resultados obtenidos con estos procedimientos con los logrados tras aplicar el Código Técnico de la Edificación en los mismos emplazamientos, evidencia la necesidad de corregir dicha normativa debido a que no realiza una caracterización adecuada de la exposición a la solicitud por humedad en las fachadas del territorio español, suponiendo un grave peligro que afecta tanto a las construcciones como al bienestar de sus ocupantes.

La obtención de diferentes indicadores y relaciones entre ellos proporciona nuevas herramientas para determinar valores de índices de lluvia batiente y presión eólica simultánea a la lluvia batiente más precisos como son los índices diarios a partir de datos mensuales o incluso anuales, posibilitando la opción de analizar muchos más emplazamientos, limitados anteriormente por las características de sus registros, con el objetivo de caracterizar el territorio español de la forma más exhaustiva posible.

3.- Alcance

La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) [10] ha sido la encargada de suministrar el conjunto de los datos estudiados de pluviometría, velocidad y dirección de viento registrados entre los años 2006 y 2016 (ambos inclusive) en todas las estaciones meteorológicas situadas en las comunidades autónomas de Andalucía, Aragón, Castilla y León, Cataluña, Galicia y Navarra y las ciudades de Ceuta y Melilla (incluidas en la hoja resumen de Andalucía).

Para el desarrollo de este proyecto, se ha realizado el análisis de dos fenómenos climatológicos recopilados en dos tipos de registros diferentes:

El primero de ellos referente a la precipitación, en los que aparece la cantidad de agua acumulada en una superficie horizontal diariamente en cada estación, cuantificado en décimas de milímetro, que se transformaron a mm o l/m² para obtener los resultados en unidades internacionalmente utilizadas. Se han descartado los días en los que había precipitación acumulada y aquellos en los que la precipitación era prácticamente inapreciable, siendo inferior a una décima de milímetro.

El viento es el segundo registro analizado, en cuya recopilación aparece la velocidad del viento en km/h que se convirtió a m/s y la dirección del viento en decenas de grado que se transformó a grados. Estos datos aparecen en 4 franjas horarias cada día (0:00, 7:00, 13:00 y 18:00), calculándose para cada día una media de la velocidad y de la dirección del viento. En estos registros, se han descartado los días que no presentaban datos, aquellos que el viento estaba en calma o era tan variable que no proporcionaba una dirección válida.

A pesar de que España cuenta con un gran número de estaciones pluviométricas con registros distribuidas a lo largo de todo su territorio, la recopilación de datos de velocidad del viento y, todavía en menor medida, de la dirección de éste, es mucho menos común debido a que se han recopilado de forma discontinua durante el tiempo o a que sólo están disponibles desde hace pocos años. De esta forma, se han recibido datos de 2530 estaciones meteorológicas distribuidas entre las seis comunidades autónomas objeto de este estudio con datos de precipitación, mientras que únicamente son 417 las estaciones obtenidas que expresan datos de velocidad y dirección de viento. Así pues, son estas últimas estaciones las que determinan el número de datos a analizar en este proyecto.

Con el fin de obtener resultados característicos en este trabajo, se han impuesto varias condiciones imprescindibles a la hora de considerar los datos reunidos en una estación para su posterior análisis. Las estaciones cuyos datos se han considerado en el estudio cuentan al menos con 5 años de recopilación de datos simultáneos de precipitación y viento con un porcentaje de omisión de datos daDRI menor del 20% para el total de años analizados, con un porcentaje anual de omisión de datos daDRI menor del 30%. La aplicación de estos criterios ha reducido a 343 la cifra de estaciones meteorológicas con datos válidos para el trabajo, siendo éste un número significante.

*Incorporación de una caracterización direccional
para la estimación detallada del riesgo de
penetración de humedad en fachadas españolas*

| COMUNIDAD AUTÓNOMA | Nº ESTACIONES TOTALES | Nº ESTACIONES CON DATOS VÁLIDOS | km2 | HABITANTES | km2/ESTACIÓN | HABITANTES/ESTACIÓN |
|--------------------|-----------------------|---------------------------------|----------|------------|--------------|---------------------|
| ANDALUCÍA | 123 | 100 | 87268 | 8409738 | 873 | 84097 |
| ARAGÓN | 64 | 52 | 47720,25 | 131463 | 918 | 2528 |
| CASTILLA Y LEÓN | 104 | 92 | 94226 | 2418694 | 1024 | 26290 |
| CATALUÑA | 71 | 52 | 32106,5 | 7496276 | 617 | 144159 |
| GALICIA | 34 | 29 | 29575 | 2708339 | 1020 | 93391 |
| NAVARRA | 21 | 18 | 10391 | 636142 | 577 | 35341 |

Figura 3.1.- Tabla resumen de las estaciones, superficie y habitantes por CCAA (datos obtenidos de Wikipedia)

En la comunidad autónoma de Andalucía existe gran diversidad de tipos climáticos entre sus diferentes zonas. Según la clasificación de Köppen [11], esta comunidad cuenta en su mayoría con un clima templado con verano seco y caluroso, aunque también existen zonas con climas desérticos, fríos con veranos secos, templado con verano seco y suave y clima estepario frío.

Aragón comprende varios climas o microclimas a lo largo de la comunidad debido a su irregular relieve. Köppen ordenaría el clima del territorio aragonés casi por completo entre los climas templado sin estación seca con verano suave, templado sin estación seca con verano caluroso y clima estepario frío, aunque coexistan también en esta comunidad en pequeñas zonas climas templado con verano seco y caluroso, templado con verano seco y suave y clima frío sin estación seca.

La comunidad autónoma de Castilla y León tiene un clima oceánico u oceánico mediterráneo en gran parte de su territorio, en una fracción de la meseta central un clima mediterráneo cálido y en zonas de montaña un clima hemiboreal mediterráneo o subpolar con verano seco. Según la clasificación de Köppen, el clima castellanoleonés se divide prácticamente en templado con verano seco y suave o templado sin estación seca con verano suave, a pesar de que existan pequeñas zonas con clima frío sin estación seca, estepario frío o templado con verano seco y caluroso.

Cataluña engloba un clima, en general, mediterráneo, presentando según la región estudiada un clima suave, un clima continental mediterráneo o un clima de alta montaña. Köppen englobaría el clima de este territorio en templado con verano seco y caluroso, templado sin estación seca y con verano suave, templado sin estación seca con verano caluroso, templado con verano seco y suave y clima frío sin estación seca.

El territorio que comprende Galicia varía entre un clima oceánico puro y un clima suboceánico. Según Köppen, el clima de esta comunidad es en su mayoría templado sin estación seca con verano suave y templado con verano seco y suave en la zona sur y central de la misma.

Navarra sufre una transición gradual entre el clima oceánico puro y el clima mediterráneo. Según la clasificación de Köppen, su clima estaría comprendido entre el templado sin estación seca con verano suave, templado sin estación seca con verano caluroso y el clima estepario frío.

Para mayor información sobre la climatología en España, especialmente en las CCAA analizadas en el proyecto, se adjuntan diversos mapas en el Anexo V extraídos del Instituto Nacional Geográfico [12].

Para la caracterización en todo el territorio español de la estimación del riesgo de penetración de humedad en las fachadas, se han añadido los resultados obtenidos en 266 estaciones meteorológicas distribuidas en el resto de comunidades autónomas (a excepción de Canarias) con el fin de desarrollar mapas que muestren la exposición a lluvia batiente (al índice daDRI en concreto) y a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente (al índice dDRWP en este caso) en cualquier ubicación española. Estos mapas podrían sustituir a los presentes actualmente en el CTE para definir el grado de impermeabilidad mínimo requerido en las fachadas, caracterizando el riesgo de penetración de agua en los cerramientos verticales españoles con mayor adecuación y de forma más prestacional a la solicitud real de estos.

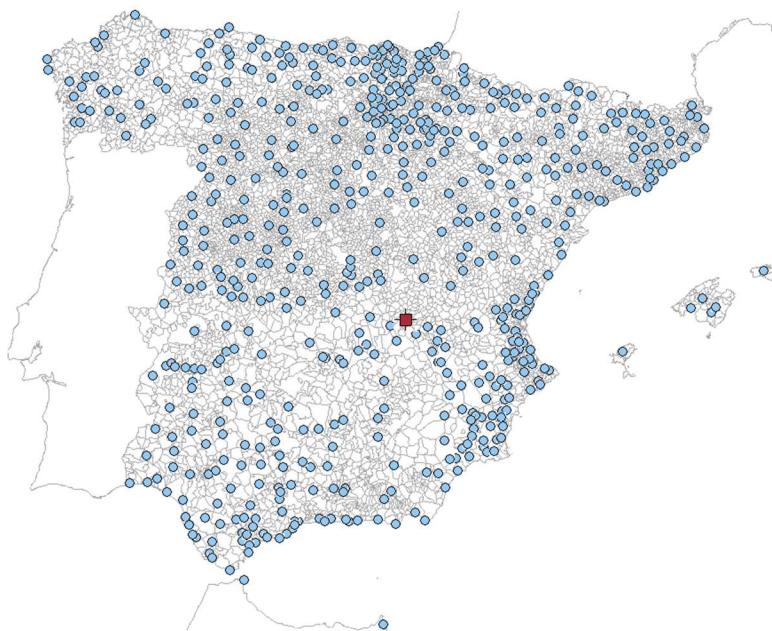


Figura 2.2.- Mapa con las estaciones meteorológicas analizadas para la realización de los mapas de exposición daDRI y dDRWP

4.- Metodología

Una fiable estimación de la solicitud por humedad sobre las fachadas de los edificios conlleva imprescindiblemente la determinación de la cantidad de agua atmosférica recibida sobre ellas, debido a que es la responsable del humedecimiento de estos cerramientos, y la presión eólica simultánea al fenómeno de la precipitación, ya que es la responsable de la penetración del agua al interior de los materiales de construcción del edificio. En los siguientes puntos se explican los procedimientos utilizados para conseguir cuantificar ambas acciones correctamente.

Este proyecto ha sido desarrollado utilizando una metodología condicionada por los registros climatológicos recopilados en las distintas estaciones meteorológicas facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), adaptando las formulaciones normalizadas en el estándar internacional actual ISO 15927-3:2009 a las particularidades de los datos diarios simultáneos de lluvia y viento disponibles en los emplazamientos estudiados.

4.1.- Determinación del aporte de agua recibido por los cerramientos verticales

Si no se produjera viento durante los eventos de precipitación, las gotas de agua trazarían una trayectoria vertical natural. El viento simultáneo a la precipitación impone una componente horizontal a la velocidad de caída de estas gotas, siendo por tanto el responsable del aporte de agua atmosférica a los cerramientos verticales de los edificios, conocido como lluvia batiente (wind driven rain o WDR).

En las últimas décadas, con el objetivo de establecer aproximaciones para evaluar la exposición a la lluvia batiente, han sido abundantes los estudios de campo y mediciones empíricas que se han desarrollado mientras se producían las precipitaciones. El producto de estos estudios ha sido la denominada relación WDR (WDR-relationship), una relación semi-empírica que permite cuantificar la lluvia batiente que reciben las fachadas a partir del registro simultáneo de la intensidad de lluvia, de la velocidad del viento y de la dirección de éste. De esta forma, el valor de la lluvia batiente WDR (l/m^2) recibida se aproxima como el producto de la intensidad de la lluvia registrada sobre una superficie horizontal R_h (l/m^2) de la velocidad del viento U (m/s) y de un coeficiente empírico de ajuste k (m/s) que depende del tamaño de la gota de agua característico de suceso de precipitación, oscilando normalmente entre 0,20 y 0,25 s/m , siendo mayor cuando mayor es la intensidad de estos sucesos (si bien en condiciones extremas su variabilidad puede oscilar entre 0,1 y 0,5 s/m).

$$WDR = k * U * R_h$$

Esta relación, a pesar de suponer un flujo estacionario y horizontal para el viento, perpendicular a la superficie de la fachada estudiada, además de depender su precisión de la idoneidad de los datos climatológicos y del coeficiente de ajuste de k , funda todo el desarrollo posterior realizado en este campo. Así pues, ofrece la posibilidad de establecer el grado de exposición a la humedad de cualquier cerramiento vertical exclusivamente a partir de los registros climatológicos de precipitación y viento simultáneos obtenidos en el emplazamiento.

Dada la gran variabilidad del coeficiente k en cada evento de precipitación, es frecuente a nivel internacional recurrir a la forma más elemental de esta relación, soslayando este coeficiente para determinar un indicador de exposición general, que nos permite obtener un índice de lluvia batiente (m^2/s) o driving rain index (DRI). Este índice compara el nivel de exposición a la humedad atmosférica entre diferentes emplazamientos y orientaciones en un espacio de tiempo, como promedio anual (annual driving rain index o aDRI).

$$aDRI = \frac{\sum_{i=1}^{años} U_i * \frac{R_{h_i}}{1000}}{años}$$

Dependiendo de los intervalos de tiempo de los datos meteorológicos empleados, se obtiene una precisión variable en la estimación de la exposición. Utilizando períodos de tiempo más exhaustivos se disminuye el error de promedio incurrido y elimina la velocidad del viento de aquellos intervalos donde no se producen precipitaciones. De esta forma, los índices obtenidos se denominan aaDRI (basado en registros anuales), maDRI (basado en registros mensuales) o daDRI (basado en registros diarios).

$$aaDRI = \frac{\sum_{i=1}^{años} U_i * \frac{R_{h_i}}{1000}}{años}$$

$$maDRI = \frac{\sum_{i=1}^{meses} U_i * \frac{R_{h_i}}{1000}}{años}$$

$$daDRI = \frac{\sum_{i=1}^{días} U_i * \frac{R_{h_i}}{1000}}{años}$$

La simplicidad de cálculo de estos índices ha permitido que hayan sido empleados en un número considerable de países en las últimas décadas.

Para caracterizar direccionalmente la exposición a la lluvia batiente de cada una de las posibles orientaciones de las fachadas de un edificio, hemos añadido una componente direccional al cálculo del daDRI, ya recogida en la propia norma ISO 15927-3, siendo D la dirección media del viento en grados ($^{\circ}$) y θ la orientación de la fachada a estudiar en grados ($^{\circ}$).

$$daDRI = \frac{\sum_{i=1}^{días} U_i * \frac{R_{h_i}}{1000} * \cos(D - \theta)}{años}$$

Esta relación ha permitido elaborar un gráfico direccional en cada estación meteorológica estudiada en el cual observamos las direcciones con mayor y menor exposición a la lluvia batiente, pudiendo plantear soluciones constructivas exclusivas para cada cerramiento vertical dependiendo de la orientación de éste, dado que no todos se encuentran idénticamente expuestos.

4.2.- Determinación de la presión eólica simultánea a la lluvia batiente

La presión eólica simultánea a la lluvia batiente constituye el segundo factor imprescindible a la hora de caracterizar la estimación del riesgo de penetración de humedad en fachadas, siendo la culpable de la inclusión del aporte de agua producido por la lluvia batiente al interior de los materiales. Este parámetro se considera el conductor de la prueba en todos los ensayos internacionales que evalúan la estanqueidad máxima de las soluciones constructivas [13-14]. La máxima diferencia de presión que resiste el cerramiento ante un aporte continuo de agua sin presentar humedades en la cara interior del mismo determina la prestación de estanqueidad de la solución constructiva.

La ecuación de Bernouilli es utilizada comúnmente para el cálculo de la diferencia de presión o presión eólica simultánea a la precipitación (driven rain wind pressure o DRWP). Esto se debe a que no existe una norma que estandarice el uso de datos climatológicos de una determinada precisión como sí ocurre en el caso del cálculo de la lluvia batiente. El DRWP se calcula por tanto como el producto de la densidad del aire (kg/m^3), por la velocidad del aire U (m/s) al cuadrado, por el coseno de la resta entre la dirección media del viento D ($^{\circ}$) menos la dirección de la fachada a estudiar θ ($^{\circ}$).

$$DRWP = \frac{1}{2} * \rho_{aire} * U^2 * \cos(D - \theta)$$

El cálculo de la presión eólica simultánea a la precipitación puede hacerse a partir de registros anuales, donde se realiza un promedio entre los valores medios anuales de los registros necesarios. De esta forma obtenemos el valor de aDRWP.

$$aDRWP = \frac{\sum_{i=1}^{años} \frac{1}{2} * \rho_{aire} * U^2 * \cos(D - \theta)}{años}$$

La necesidad de reducir el error de promedio y simultaneidad requiere utilizar registros meteorológicos más exhaustivos, estudiando la presión eólica simultánea a la lluvia en intervalos diarios o mensuales, dando lugar a dDRWP (basado en registros diarios) y mDRWP (basado en registros mensuales).

$$dDRWP = \frac{\sum_{i=1}^{días} \frac{1}{2} * \rho_{aire} * U^2 * \cos(D - \theta)}{años}$$

$$mDRWP = \frac{\sum_{i=1}^{meses} \frac{1}{2} * \rho_{aire} * U^2 * \cos(D - \theta)}{años}$$

Los estudios realizados en años anteriores en España no han considerado la componente direccional de los datos climáticos en el cálculo del DRWP, por lo que las solicitudes estimadas no diferenciaban entre las posibles orientaciones de las distintas fachadas del edificio. La introducción de la caracterización direccional permite obtener gráficos direccionales para cada emplazamiento en los que apreciamos las orientaciones donde se dan los máximos y mínimos valores de dDRWP en cada ubicación.

4.3.- Determinación del índice de riesgo de penetración de agua

La caracterización de las exposiciones a lluvia batiente y a la presión eólica simultánea a ella son imprescindibles para determinar adecuadamente el riesgo de penetración de agua a través de las fachadas de los edificios. Existen diversas investigaciones que demuestran que la lluvia es capaz de penetrar en las fachadas incluso en ausencia de presión eólica simultánea, pero únicamente en fachadas con poros, grietas o defectos de más de 5 mm [15]. En fachadas nuevas o sin defectos, es necesaria la combinación de ambos parámetros.

Los valores de exposición daDRI y dDRWP obtenidos en cada emplazamiento se combinan para determinar el índice de exposición de riesgo de penetración de agua (risk index of water penetration o RIWP) en los cerramientos verticales. En primer lugar, se normalizan los índices de daDRI y dDRWP obtenidos para cada ubicación j , comparándolos con los valores máximos y mínimos obtenidos en el total de los emplazamientos analizados, obteniendo el valor 0 aquella ubicación con el menor índice daDRI o dDRWP y el valor 1 el emplazamiento con el máximo índice daDRI o dDRWP.

$$\begin{aligned} daDRI_{nom_j} &= \frac{daDRI_j - daDRI_{mín}}{daDRI_{máx} - daDRI_{mín}} \\ dDRWP_{no_j} &= \frac{dDRWP_j - dDRWP_{mín}}{dDRWP_{máx} - dDRWP_{mín}} \end{aligned}$$

En este caso, el valor máximo normalizado de daDRI se da en la estación meteorológica de Cabo Vilán (La Coruña, Galicia), mientras que el valor mínimo normalizado se encuentra en la estación de La Seu D'Urgell (Lérida, Cataluña). El valor máximo normalizado de dDRWP también se da en la provincia de La Coruña, Galicia, concretamente en la estación de Estaca de Bares. En cambio, el mínimo dDRWP normalizado se ubica en la estación Cortes de la Frontera (Málaga, Andalucía) aunque el obtenido en La Seu D'Urgell es prácticamente igual a éste.

Calculados estos valores normalizados, se combinan en un único índice que permite comparar el riesgo de penetración de humedad en las fachadas entre diversos emplazamientos teniendo considerando tanto la lluvia batiente como la presión eólica simultánea a la precipitación.

$$RIWP_j = \sqrt{\left(daDRI_{nom_j}\right)^2 + \left(dDRWP_{nom_j}\right)^2}$$

A medida que los valores normalizados de daDRI y dDRWP son mayores, mayor es el RIWP adquirido por esa ubicación. El máximo valor de RIWP posible sería $\sqrt{2}$, si en el mismo emplazamiento se dieran el máximo índice de daDRI y DRWP. El mínimo posible 0, si en el mismo lugar se obtuviera el mínimo valor de daDRI y DRWP. Se considera que ambos parámetros tienen igual influencia en el proceso de infiltración de humedad en el interior de las fachadas, aunque se podrían añadir factores de ponderación según el peso que se considere que tiene cada uno de los agentes en la penetración de humedad en los cerramientos.

Los valores de máximo RIWP se encuentran todos ellos ubicados en estaciones meteorológicas de la provincia de La Coruña, en Galicia. El máximo de todos ellos es de 1,212 y se localiza en la estación de Estaca de Bares. El segundo valor máximo es de 1,209,

*Incorporación de una caracterización direccional
para la estimación detallada del riesgo de
penetración de humedad en fachadas españolas*

localizado en la estación Cabo Vilán. En la estación de Fisterra y en la de Santiago de Compostela se registran los valores de 1,171 y 0,955 respectivamente. Todos estos valores son muy elevados y merecen tenerse muy en cuenta a la hora de estimar la solicitud por humedad de los cerramientos verticales en estos emplazamientos.

4.4.- Cálculo de períodos de retorno

En el ámbito de la ingeniería es muy común el uso de períodos de retorno para estimar la probabilidad de que ocurra un evento concreto en un espacio de tiempo determinado o el intervalo de tiempo que separa dos acciones de una concreta dimensión.

La teoría o análisis de valores extremos es la rama de la estadística encargada del estudio de la probabilidad de aparición de valores más extremos que los examinados con anterioridad, dada una muestra de una variable aleatoria [16]. La distribución de Gumbel se usa para modelar la distribución del máximo o mínimo, así pues, es utilizada en el cálculo de valores extremos [17-19]. Resulta muy útil para predecir la distribución del máximo valor de una variable a través de los datos máximos de esa variable en una muestra con varios registros.

En este proyecto se han utilizado los datos de cantidad máxima diaria de lluvia registrada cada año analizado en cada estación y la velocidad máxima de viento que ha tenido lugar cada año en las estaciones meteorológicas para estimar los valores máximos de estas variables que se esperan sean superados de media una vez cada 5, 10, 25, 50, 100, 250 e incluso 500 años. Es decir, se ha calculado para estas dos variables el período de retorno de 5, 10, 25, 50, 100, 250 y 500 años.

De esta forma, a pesar de no ser la pluviometría media anual y la velocidad media del viento, de forma individual, dos parámetros fundamentales en este proyecto, resulta muy interesante estudiar los valores máximos que se estima que se producirán en cada emplazamiento con distintos períodos de retorno desde 5 hasta 500 años para aplicar soluciones constructivas, dependiendo del uso de cada edificio, que deban aguantar estos valores.

Esta técnica de estudio se ha añadido a la elaboración de este proyecto con objeto de abordar una temática que actualmente no se imparte en el Grado de Ingeniería Mecánica, tratando de ampliar así los conocimientos en un aspecto de uso habitual en diferentes aplicaciones de la ingeniería.

Para obtener mayor información sobre la formulación matemática aplicada puede consultarse en el Anexo IV, donde se detalla el método de Gumbel.

5.- Resultados y discusión

5.1.- Ficha de datos tipo de una estación meteorológica

Los resultados logrados tras el estudio de los datos diarios de pluviometría y de velocidad y dirección del viento de cada estación meteorológica se han recopilado en unas fichas modelo divididas en dos páginas, que analizamos a continuación. Posteriormente, estas fichas han permitido desarrollar unas hojas resumen (Anexo I), donde se localizan todos los resultados obtenidos en las 343 estaciones estudiadas, posibilitando así el análisis y comparación de los mismos para obtener las conclusiones pertinentes del proyecto.

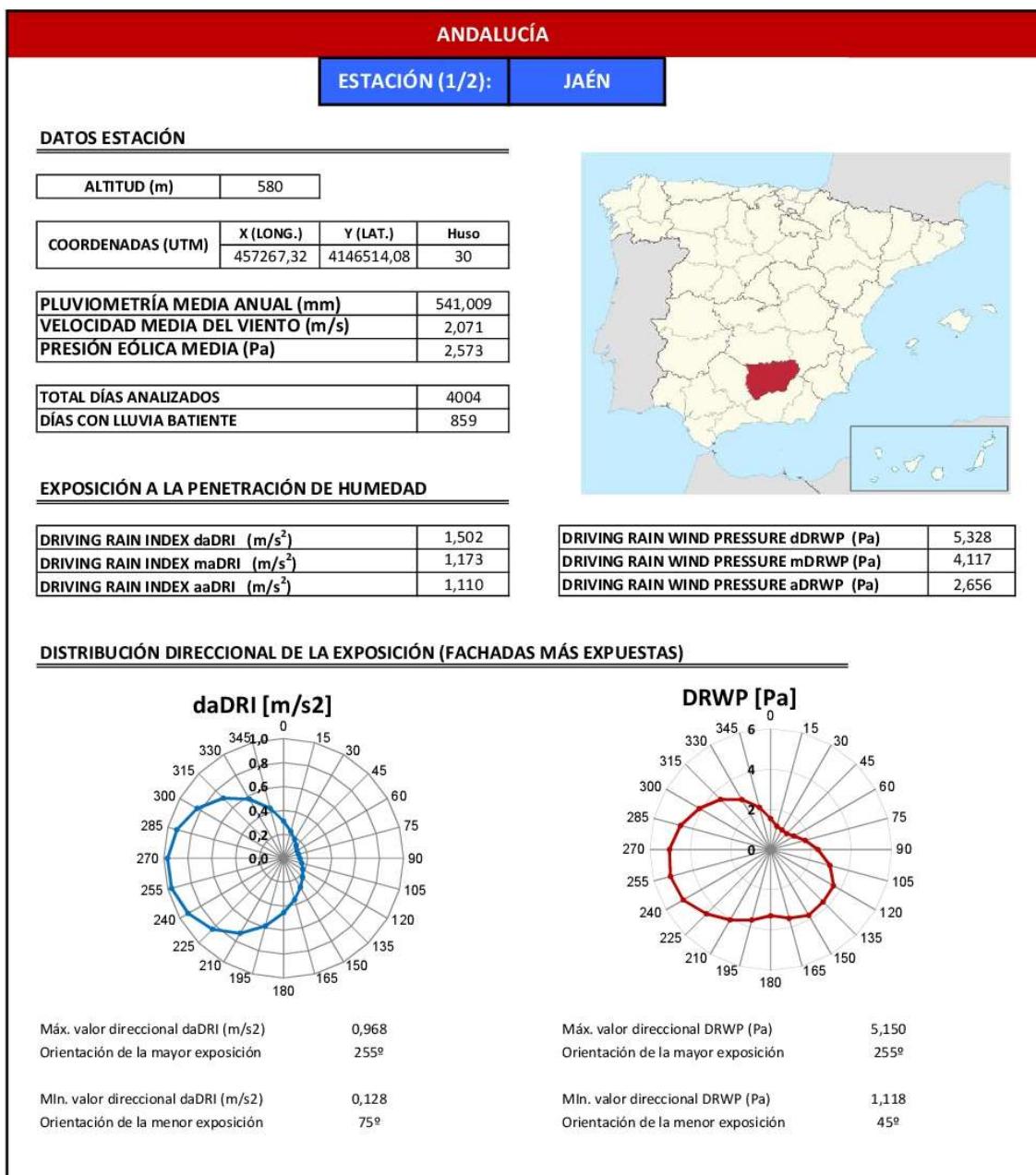


Figura 5.1.1.- Ficha tipo de resultados de una estación (Página 1)

*Incorporación de una caracterización direccional
para la estimación detallada del riesgo de
penetración de humedad en fachadas españolas*

En la parte superior de las dos páginas que componen la ficha de resultados de una estación encontramos el nombre de la comunidad autónoma donde se sitúa la estación y el nombre de la misma.

En la primera página, en la parte superior derecha se ha colocado un mapa de España en el que destaca, coloreada en rojo, la provincia donde se encuentra la estación analizada. Este mapa nos permite situar directamente la estación de forma más concreta en el territorio español, dado que en muchas ocasiones no sabríamos localizarlas en su provincia correspondiente únicamente por su nombre.

Los datos que facilitan la localización exacta de la estación aparecen en la zona izquierda de la parte alta junto a los registros climáticos de pluviometría media anual en mm, la velocidad media del viento en m/s y la presión eólica media en Pa. Seguidamente se muestra el número total de días analizados en esa estación y la cantidad de ellos en los que se registró lluvia batiente.

En la franja media de la hoja encontramos los valores referentes a la exposición a la penetración de humedad en esta estación meteorológica. Aparece el índice de lluvia batiente (DRI) basado en registros diarios, mensuales y anuales (daDRI, maDRI y aaDRI respectivamente) y los datos de presión eólica simultánea a la lluvia batiente (DRWP) a partir de registros diarios, mensuales y anuales (dDRWP, mDRWP y aDRWP).

En la zona inferior aparece la caracterización direccional realizada en este proyecto para la evaluación del riesgo de penetración de humedad en fachadas, representada en mapas direccionales que muestran los valores daDRI (m/s^2) y dDRWP (Pa) en todas las posibles orientaciones de las fachadas del emplazamiento analizado. Se destaca, en último lugar, los máximos y mínimos valores de daDRI y dDRWP direccionales, señalando las orientaciones de estas exposiciones.

En la segunda página de la hoja resumen localizamos tres gráficos característicos de la estación estudiada, donde podemos analizar la evolución anual de los valores de daDRI, de precipitaciones y de dDRWP. Estos gráficos nos permiten realizar una comparación superficial de estos datos en los años analizados, así como identificar los años utilizados para la caracterización (aquellos años con discontinuidades en los registros o falta de datos por mantenimiento de las estaciones, malfuncionamiento o errores de registro fueron descartados enteramente).

Debajo de estos gráficos aparecen los valores máximos de cantidad de lluvia en mm y de velocidad máxima de viento en m/s estimados para períodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100, 250 y 500 años.

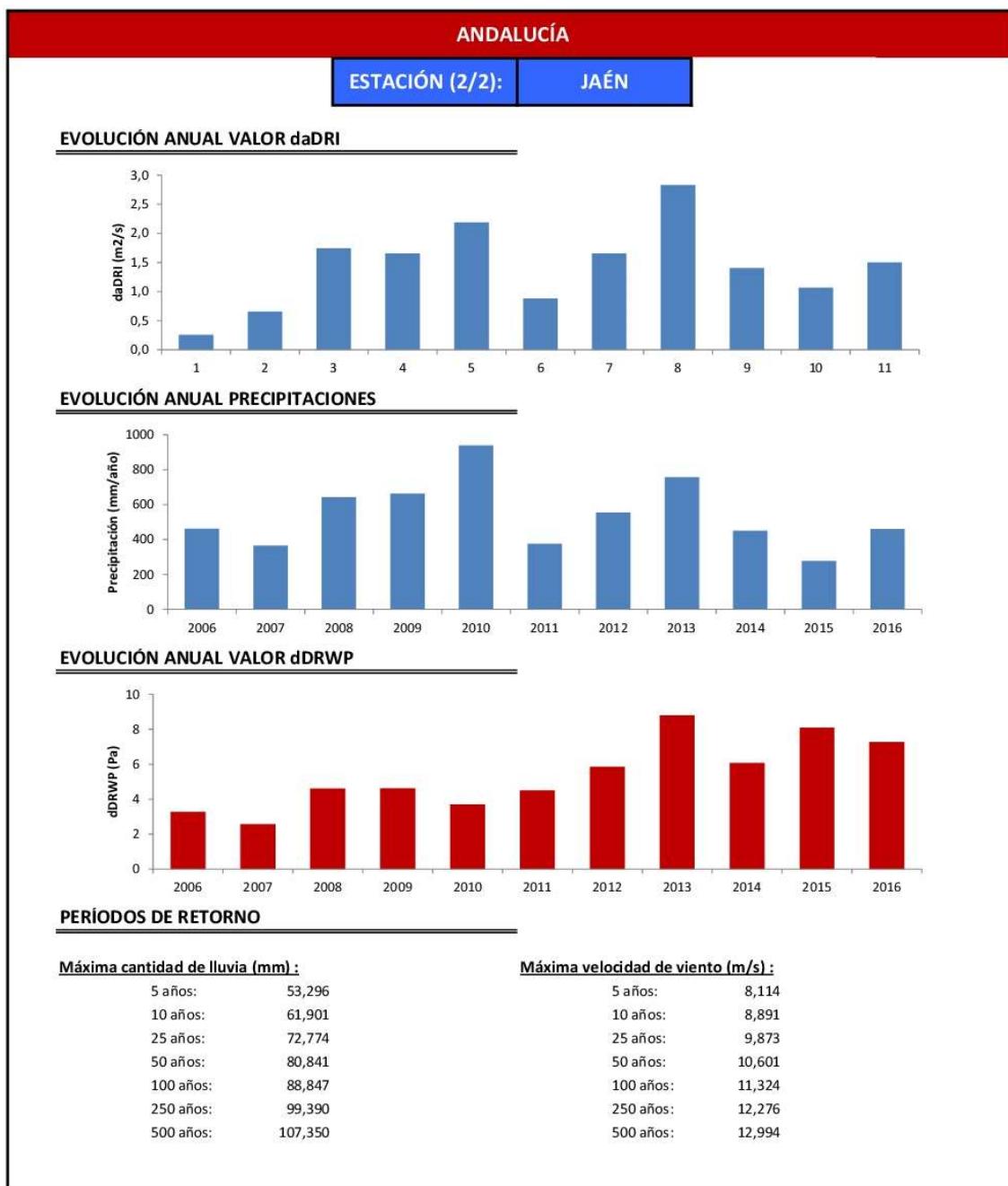


Figura 5.1.2.- Ficha tipo de resultados de una estación (Página 2)

5.2.- Análisis de resultados del proyecto

La recopilación de los registros climatológicos obtenidos en las 343 estaciones meteorológicas estudiadas en las comunidades autónomas de Andalucía, Aragón, Castilla y León, Cataluña, Galicia y Navarra en las hojas resumen (Anexo I), permite analizar los datos conjuntamente con el fin de obtener resultados definitivos que sustenten, o no, la propuesta planteada en este proyecto para determinar de forma correcta la estimación del riesgo de penetración de humedad en fachadas en estas comunidades.

Los análisis realizados se dividen en tres grupos. El primero de ellos hace referencia a la lluvia batiente y a la pluviometría, el segundo a la velocidad del viento y a la presión eólica simultánea a la lluvia y el último al grado de impermeabilidad y al RIWP. Todos los resultados alcanzados en las distintas estaciones se comparan con la asignación que les corresponde a las ubicaciones de dichas estaciones según el vigente CTE.

En alguno de los gráficos comparativos que se incluyen a continuación se han añadido las líneas de tendencia obtenidas en otros países para las mismas correlaciones [20-23].

5.2.1.- Pluviometría e índice de lluvia batiente DRI

La pluviometría media anual es uno de los dos factores que tiene en cuenta el CTE para definir el grado de impermeabilidad requerido en las fachadas de un edificio. En la gráfica 5.2.1 se observa que la relación existente entre la pluviometría media anual y el indicador de lluvia batiente recibida por la fachada daDRI es casi inexistente, confirmando que analizar la cantidad media de agua atmosférica que se recoge anualmente en una superficie horizontal no es suficiente para estimar correctamente el aporte de agua que recibirán los cerramientos laterales.

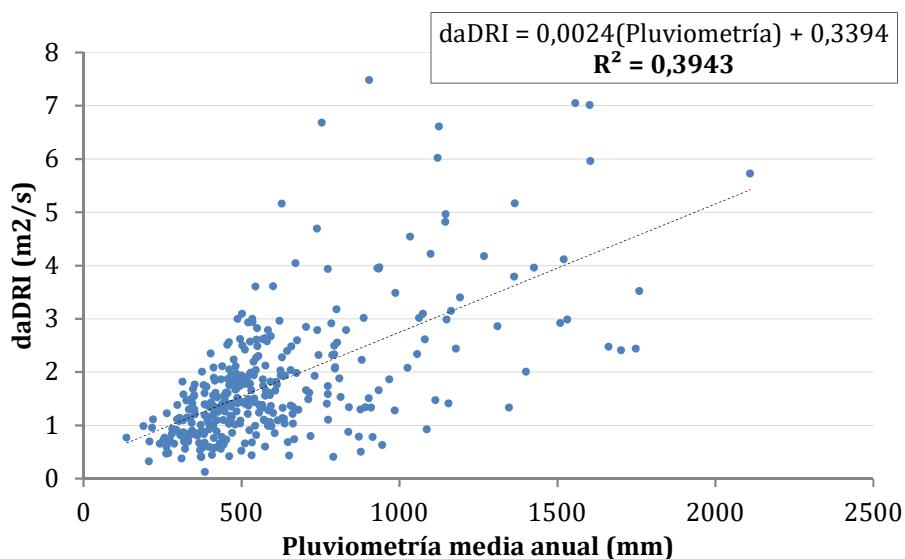


Figura 5.2.1.- Gráfica comparativa de la pluviometría media anual frente valores daDRI

Se comprueba, por tanto, la ineficiencia de la aproximación actualmente recogida por el CTE, siendo necesario el análisis simultáneo de registros (como se ha llevado a cabo en este trabajo), para determinar adecuadamente la exposición de las fachadas al humedecimiento por agua atmosférica.

La inexistencia de datos diarios de precipitación, velocidad del viento y dirección del mismo con una antigüedad suficiente en un gran número de localidades plantea la necesidad de estudiar la relación existente entre los diversos índices de lluvia batiente analizados con registros meteorológicos de distinta duración (diarios, mensuales y anuales). El objetivo es lograr mediante datos mensuales o anuales, que estiman el aporte de agua recibida por las fachadas mediante los índices maDRI y aaDRI respectivamente, un valor más preciso de exposición como es el índice de lluvia batiente basado en registros diarios (daDRI).

En las gráficas 5.2.2, 5.2.3 y 5.2.4 advertimos que entre los diversos índices de lluvia batiente existen relaciones lineales con altos coeficientes de determinación que permiten extrapolar cualquiera de los índices a partir de uno de ellos.

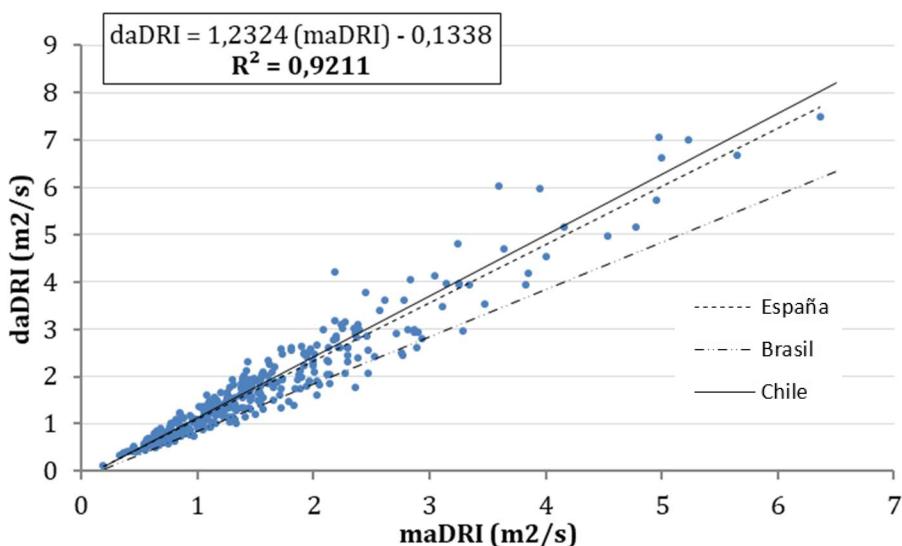


Figura 5.2.2.- Gráfica comparativa de valores maDRI frente daDRI

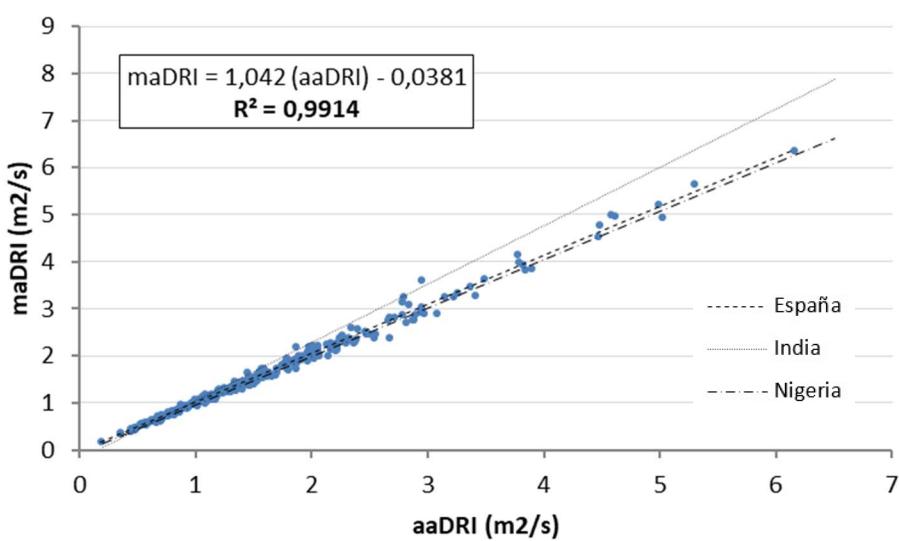


Figura 5.2.3.- Relación entre los valores aaDRI y los maDRI

*Incorporación de una caracterización direccional
para la estimación detallada del riesgo de
penetración de humedad en fachadas españolas*

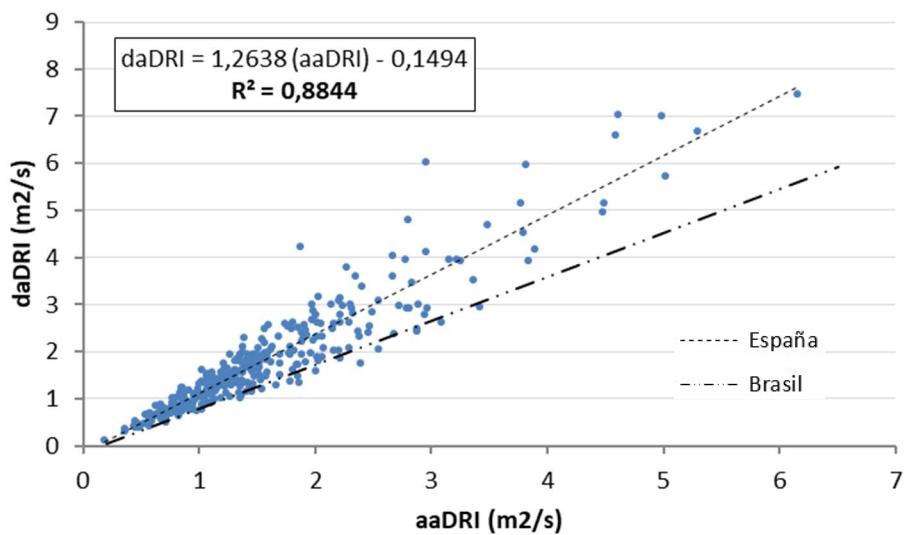


Figura 5.2.4.- Relación entre los valores aaDRI y los daDRI

Estas correlaciones permiten, en emplazamientos sin datos diarios, estimar un valor de exposición daDRI a partir de registros meteorológicos únicamente mensuales o anuales.

Añadir una caracterización direccional al estudio de la solicitación por humedad de las fachadas significa que para cada valor escalar obtenido de daDRI se deben calcular 24 valores direccionales daDRI (en el caso de este proyecto dado que se han estudiado las direcciones cada 15°). A pesar del significativo incremento del esfuerzo de cálculo requerido, este cálculo permite identificar la diferencia de exposición entre diferentes orientaciones, así como aquella más expuesta.

Los resultados obtenidos permiten a su vez plantear la relación existente entre el valor escalar daDRI de una localidad y el valor direccional máximo daDRI. Analizando la gráfica 5.2.5, resulta notable la relación lineal con un alto coeficiente de determinación existente entre ambos valores. Esto conlleva plantearse que obtener el valor escalar daDRI (con un limitado esfuerzo de cálculo), es más que suficiente para estimar la exposición a la lluvia batiente que debería caracterizar, como máximo, a todas las orientaciones de fachada en un emplazamiento. Dado que el diseño de edificios habitualmente define fachadas idénticas en todas las orientaciones, este valor de exposición debería servir como referencia para todo el diseño.

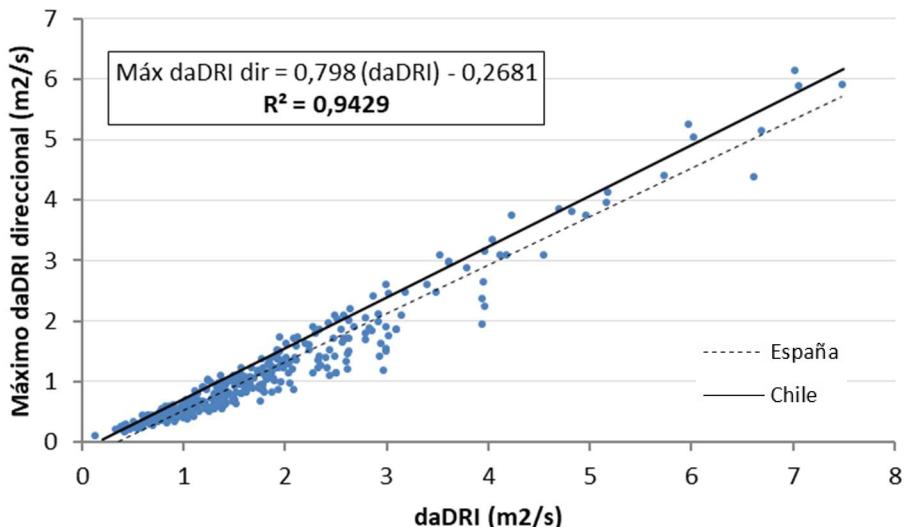


Figura 5.2.5.- Gráfica comparativa de los valores daDRI escalares frente a los direccionales máximos daDRI

La pluviometría media anual recibida en las estaciones meteorológicas estudiadas se ha comparado con las zonas pluviométricas de promedios en las que se encuentran cada una de ellas aplicando el Código Técnico de la Edificación. En la gráfica 5.2.6 se observa que las zonas pluviométricas, a pesar de tener siempre máximos menores en cada una de ellas que su precedente, contienen valores de precipitación media anual que podrían estar incluidas en otras zonas pluviométricas, especialmente las zonas II, III y IV en las que existen muchos valores comprendidos entre 250 y 1000 mm/año.

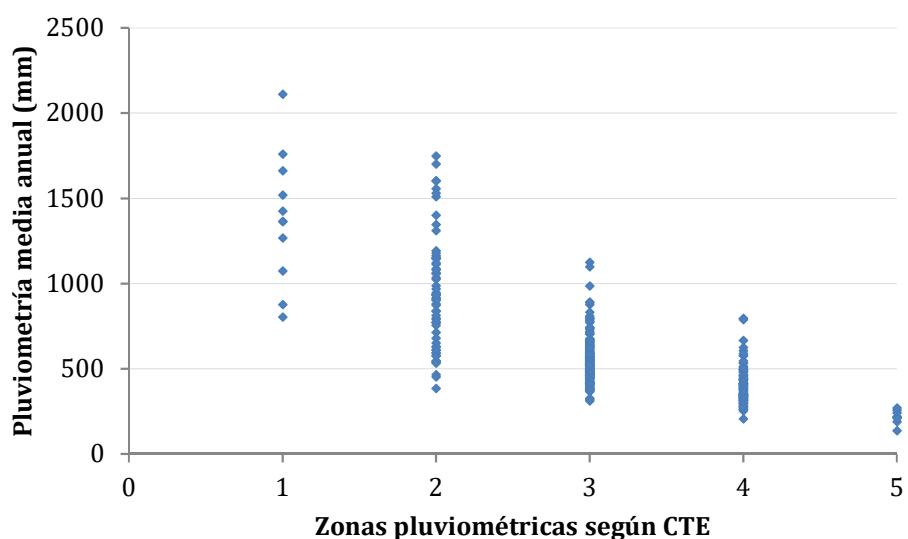


Figura 5.2.6.- Gráfica comparativa de las zonas pluviométricas asignadas por el CTE frente a la pluviometría media anual

La comparación entre el índice daDRI obtenido para cada estación y la zona pluviométrica de promedios asignada por el CTE vuelve a poner de manifiesto la incoherencia de utilizar dichas zonas pluviométricas a la hora de asignar un grado de exposición a la lluvia batiente para una localidad. Estudiando la gráfica 5.2.7, percibimos valores en la zona II más elevados que en la zona I. Además, como ocurría en la

*Incorporación de una caracterización direccional
para la estimación detallada del riesgo de
penetración de humedad en fachadas españolas*

comparación de la zona pluviométrica del CTE con la pluviometría anual promedio, existen en las zonas II, III y IV un amplio número de estaciones que podrían perfectamente estar en cualquiera de las tres zonas, siendo que el grueso de los datos de las tres zonas pluviométricas comprende valores daDRI desde 0,5 a 3 m^2/s .

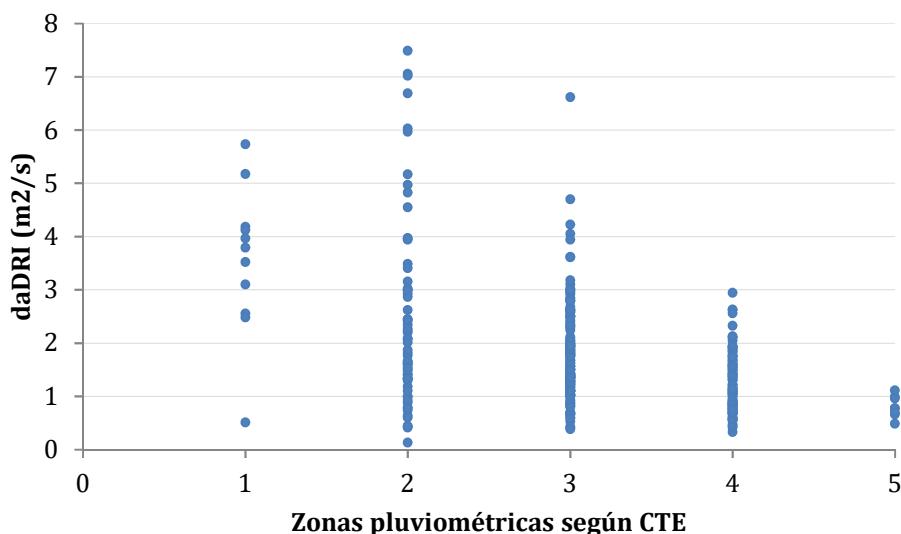


Figura 5.2.7.- Gráfica comparativa entre las zonas pluviométricas asignadas por el CTE y los valores daDRI obtenidos

5.2.2.- Velocidad media del viento, presión eólica e índice de exposición a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente DRWP

El segundo parámetro que considera el CTE para la estimación de la solicitudación por humedad de las fachadas de un edificio es el valor básico de la velocidad del viento. Debido a que no se ha calculado dicho valor básico de la velocidad del viento, se ha estudiado la relación existente entre la velocidad media del viento en m/s registrada en las estaciones meteorológicas con el índice dDRWP calculado en ellas.

A través de la velocidad media del viento obtenida en las estaciones meteorológicas, se puede calcular de manera muy sencilla a través de una única fórmula la presión eólica promedio en éstas. Debido a ello, resulta interesante comprobar si existe alguna relación entre el índice dDRWP y dicha presión eólica promedio. Se advierte en la gráfica 5.2.8 que el coeficiente de determinación de la relación es muy cercano a 0,9. Podemos concluir por tanto que sí existe tal relación, que nos permite obtener el dDRWP de una localidad a través de la presión eólica promedio en ella.

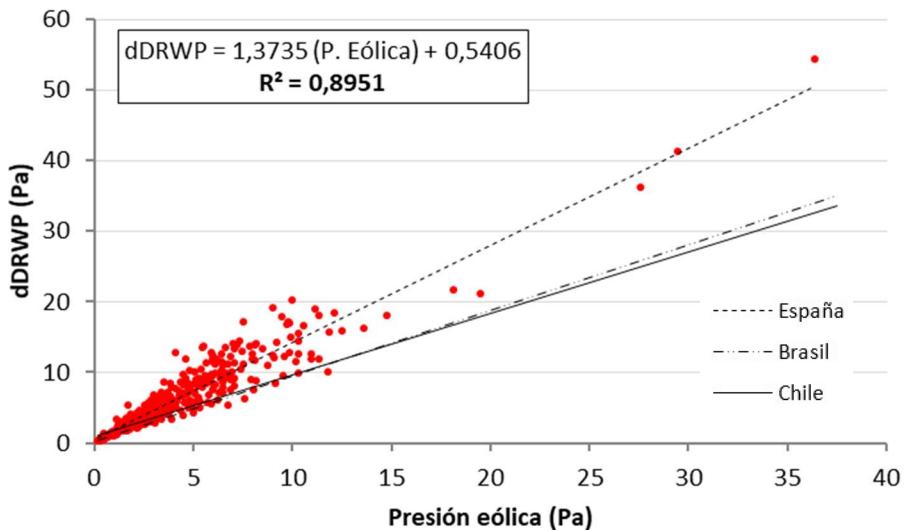


Figura 5.2.8.- Gráfica comparativa de la presión eólica media con los valores dDRWP

Como se comentó en el subapartado 5.2.1, resulta de gran interés conocer la relación existente entre los diversos índices de presión eólica simultánea a la lluvia analizados en intervalos diarios, mensuales y anuales (dDRWP, mDRWP y aDRWP) dado que la existencia de datos diarios con una antigüedad considerable es muy reducida en la actualidad. Así, es muy significativo obtener un índice más preciso como es el dDRWP a través de datos mensuales y anuales, con los que se calcula el mDRWP y aDRWP de forma respectiva. Todos los coeficientes de determinación que relacionan estos índices son muy próximos a 0,9, incluso cercanos al 1 en el caso de la relación dDRWP-mDRWP, por lo que el cálculo de cualquiera de estos tres índices a partir de uno de ellos resulta válido debido a su ajuste lineal.

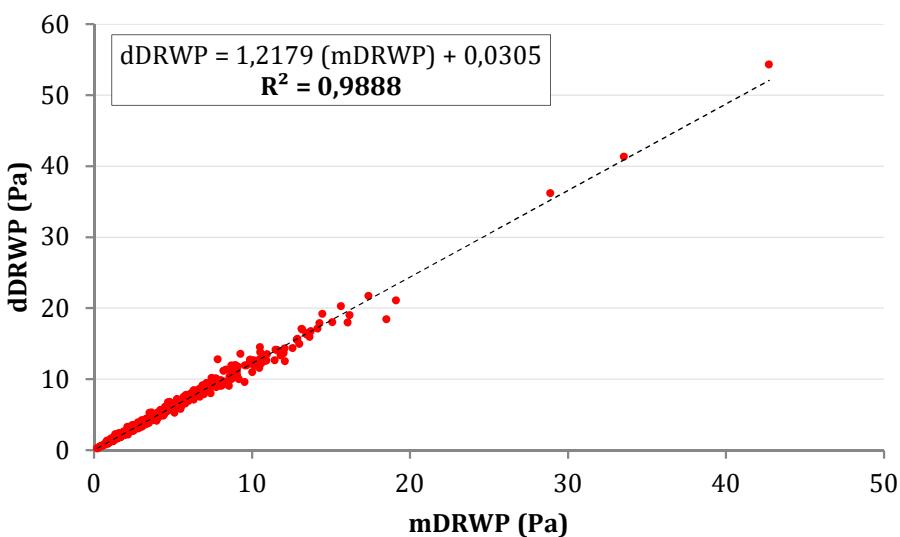


Figura 5.2.9.- Relación entre los valores mDRWP y los de dDRWP

*Incorporación de una caracterización direccional
para la estimación detallada del riesgo de
penetración de humedad en fachadas españolas*

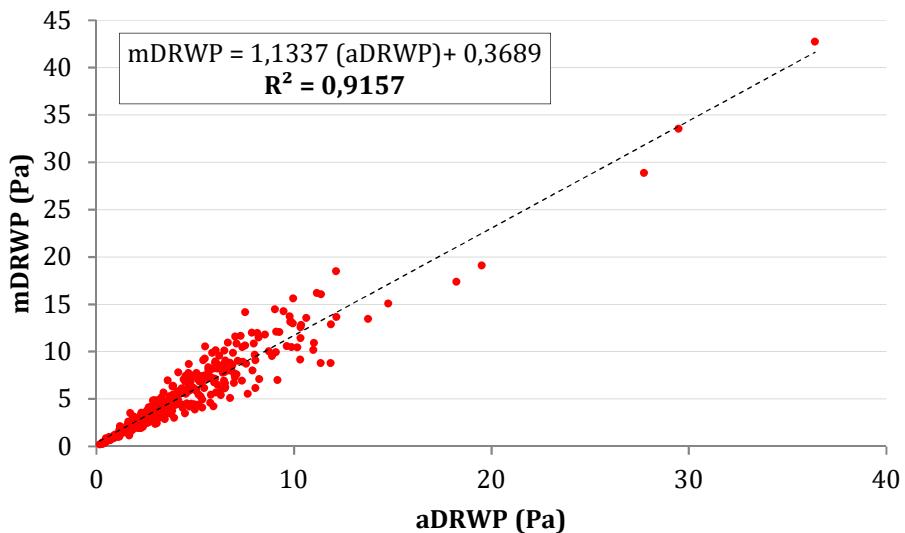


Figura 5.2.10.- Gráfica comparativa de los valores aDRWP frente a los mDRWP

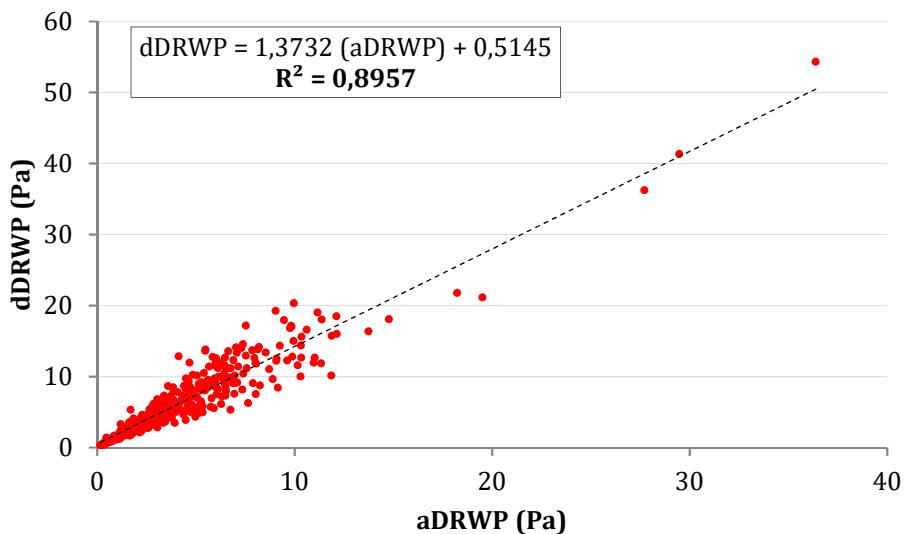


Figura 5.2.11.- Relación entre los valores aDRWP y los dDRWP

Estas correlaciones permiten estimar un valor de exposición dDRWP, en emplazamientos sin datos diarios, a partir de registros meteorológicos exclusivamente mensuales o anuales.

La componente direccional añadida en este proyecto en la estimación de la solicitud por humedad de los cerramientos lateral implica realizar el cálculo de cada valor escalar dDRWP en cada una de las orientaciones posibles a estudiar (24 en el caso de este proyecto, de 0º a 360º cada 15º), resultando por tanto un ejercicio laborioso. Por tanto, la relación existente entre el valor escalar dDRWP y el valor direccional máximo dDRWP adquiere gran atractivo y se analiza en la gráfica 5.2.12. Contemplamos que el ajuste lineal existente entre ambas tiene un coeficiente de determinación muy cercano a 1

(ajuste lineal perfecto). Así, es posible obtener el dDRWP direccional máximo a partir del valor escalar dDRWP, o simplemente considerar el valor escalar dDRWP sin tener en cuenta el carácter direccional de éste. Las fachadas de los edificios suelen ser idénticas, por lo que este valor de exposición máximo serviría como referencia para todo el diseño.

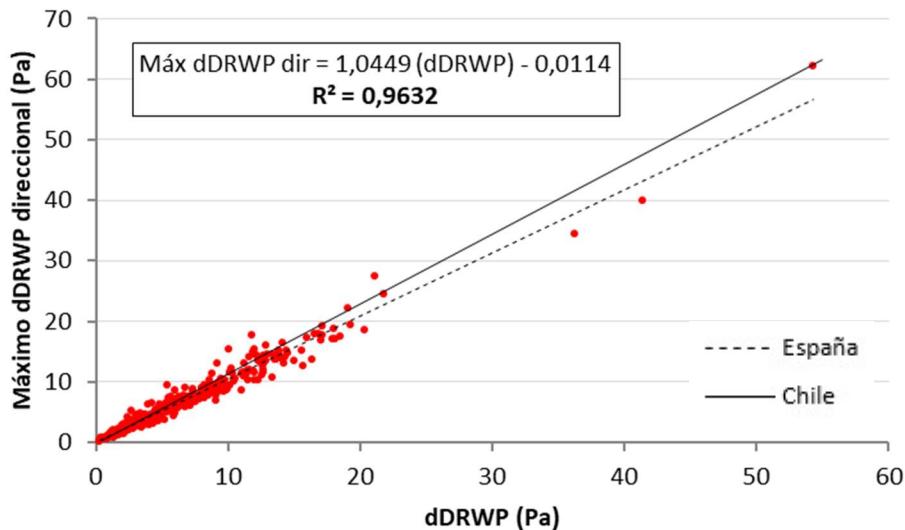


Figura 5.2.12.- Gráfica comparativa de los valores direccionales máximos dDRWP frente a los dDRWP escalares

Se ha establecido para cada una de las 343 estaciones meteorológicas analizadas la zona eólica a la que corresponden según el CTE. Obtenida dicha distribución en zonas eólicas, se han comparado las estaciones pertenecientes a cada una con la velocidad media del viento en m/s en la gráfica 5.2.13 y con el índice de presión eólica simultánea a la lluvia batiente dDRWP en la gráfica 5.2.14.

Una vez asignada la zona eólica correspondiente a cada localidad, se debe conocer la clase del entorno del edificio y la altura de éste para obtener el grado de exposición al viento del mismo. Debido a que el anemómetro se encuentra situado a una altura de 10 m (< 15 m) en las estaciones meteorológicas, se considerará ésta para calcular el grado de exposición al viento. En cuanto a la clase del entorno del edificio, se supondrá de tipo E0 (terreno despejado) que es como suelen encontrarse las estaciones.

Observando la relación existente entre la velocidad media del viento con las zonas eólicas asignadas por el CTE en la gráfica 5.3.13, resalta la cantidad de emplazamientos que podrían estar englobadas en cualquiera de ellas debido a que todas las zonas comprenden un considerable número de estaciones entre los valores 1 y 4 m/s de velocidad media del viento. Aunque sí es cierto que los valores máximos de cada zona son superiores al de la zona anterior, el hecho mencionado anteriormente pone de manifiesto la necesidad de utilizar una nueva estrategia para caracterizar el grado de exposición al viento que el vigente en el CTE.

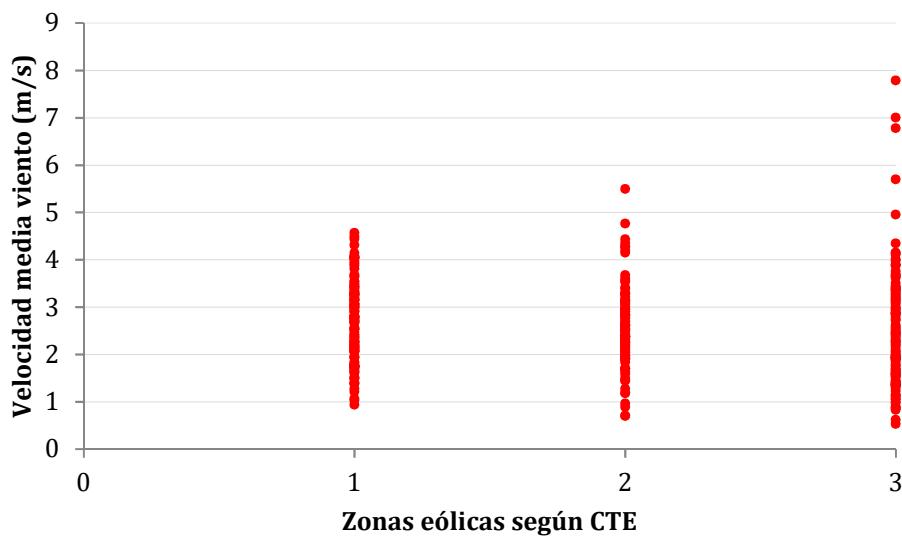


Figura 5.2.13.- Gráfica comparativa entre las zonas eólicas asignadas por el CTE frente a la velocidad media viento

En la gráfica 5.2.14, la confrontación entre las zonas eólicas de los emplazamientos definidos por el CTE con el índice dDRWP confirman la necesidad de cambiar el procedimiento actual de estimación del grado de exposición al viento. Excepto por valores muy aislados, no existe apenas diferencia entre los valores de dDRWP de las localidades englobadas en cada una de las zonas eólicas, haciendo que estos emplazamientos pudieran localizarse en cualquiera de ellas indistintamente.

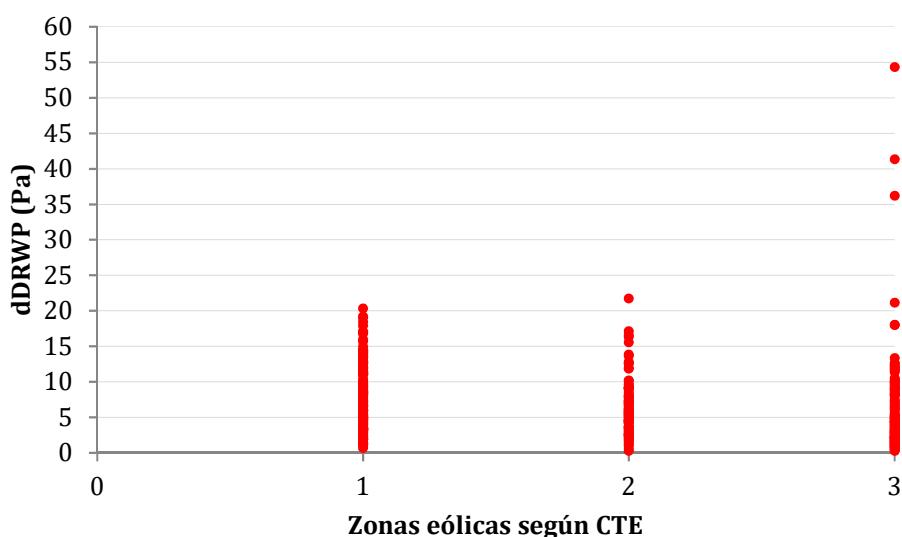


Figura 5.2.14.- Gráfica comparativa de las zonas eólicas asignadas por el CTE frente a los valores dDRWP obtenidos

5.2.3.- Lluvia batiente y presión eólica simultánea a la lluvia batiente

La necesidad de analizar tanto la lluvia batiente como la presión eólica simultánea a ella para caracterizar la solicitud de humedad por las fachadas se demuestra al comparar los valores de los índices daDRI y dDRWP en la gráfica 5.2.15. Se aprecia a simple vista que no existe una relación entre ambos valores, confirmándolo el coeficiente de determinación de la aproximación lineal de esta relación daDRI-dDRWP con un valor muy bajo.

En el caso de haber alcanzado un coeficiente de determinación cercano a valores de 0,9 o 1, cabría la posibilidad de plantearse la opción de analizar únicamente la lluvia batiente o la presión eólica simultánea a la lluvia batiente. De esta forma, podríamos calcular el otro valor mediante la relación obtenida en la gráfica 5.2.15, o de forma más práctica, obviar uno de los dos datos para la estimación del riesgo de penetración de humedad en los cerramientos verticales de un edificio.

Así pues, es imposible realizar una correcta caracterización de este peligro teniendo en cuenta únicamente uno de los dos parámetros mencionados.

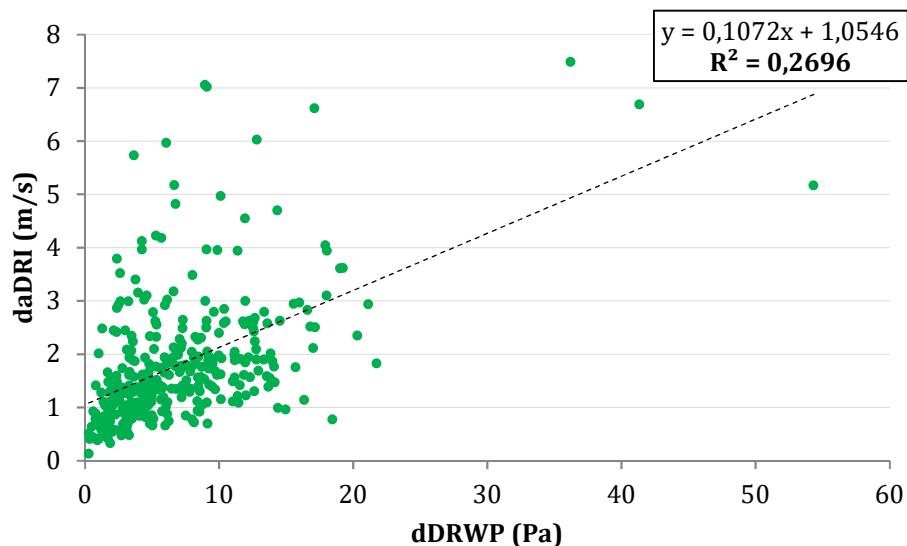


Figura 5.2.15.- Relación entre los valores dDRWP y daDRI obtenidos

5.2.4.- Grado de impermeabilidad e índice de riesgo de penetración de humedad RIWP

Siguiendo el Código Técnico de la Edificación, tras obtener la zona pluviométrica de promedios y el grado de exposición al viento en un emplazamiento, alcanzamos el grado de impermeabilidad mínimo exigido a las fachadas que determinará las soluciones constructivas necesarias para la construcción de un edificio en esa localidad.

En este estudio, una vez que se ha calculado el índice de lluvia batiente daDRI y el índice de presión eólica simultánea a la lluvia batiente dDRWP en el total de los

*Incorporación de una caracterización direccional
para la estimación detallada del riesgo de
penetración de humedad en fachadas españolas*

emplazamientos a analizar, se obtienen los valores nominales de daDRI y dDRWP para cada uno de ellos y se comparan mediante el índice de riesgo de penetración de humedad RIWP.

Las localidades más expuestas se han etiquetado en la gráfica 5.2.16, permitiendo una comparación entre todas las analizadas, a través de un único índice. Este índice puede ser utilizado para que el ente normativo correspondiente establezca las soluciones constructivas aceptables en cada situación, y que permitan garantizar la impermeabilidad en su interior de acuerdo con el riesgo de penetración de cada emplazamiento.

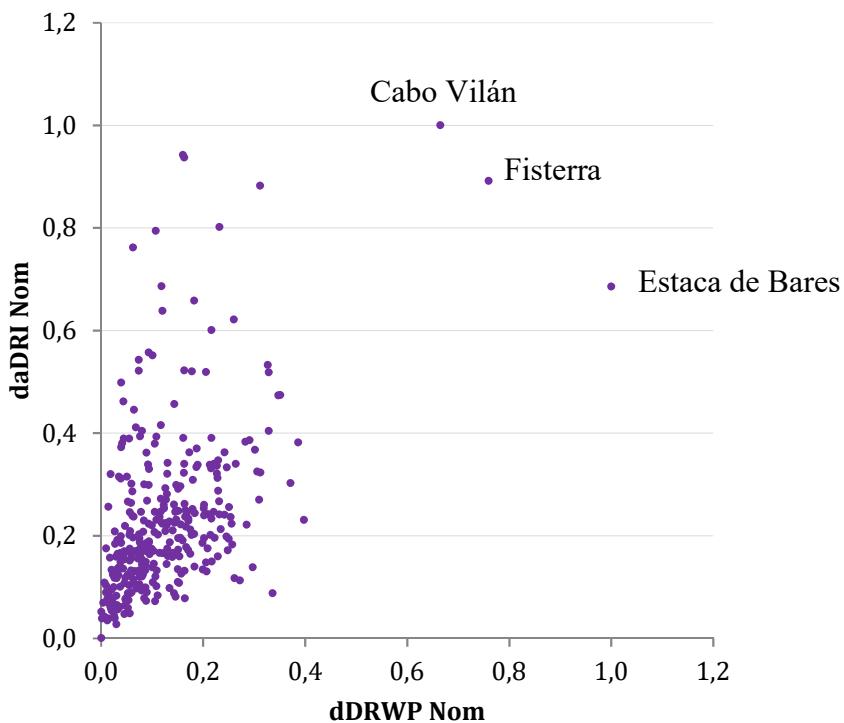


Figura 5.2.16.- Gráfica del índice de riesgo de penetración de humedad RIWP

El índice de riesgo de penetración de humedad RIWP podría sustituir al grado de impermeabilidad obtenido en el Código Técnico de la Edificación vigente. Siguiendo la suposición utilizada en el subapartado 5.2.2, se han comparado en la gráfica 5.2.17 ambos parámetros. En ella se puede observar que los cuatro grados de impermeabilidad con datos (II, III, IV y V) contienen valores de RIWP que podrían encuadrarse en cualquier otro grado, siendo esto un grave error dado que se presentarían soluciones constructivas menos restrictivas a emplazamientos que presentarían un riesgo mayor de penetración pudiendo causar daños tanto a la estructura del edificio como a sus inquilinos.

También cabe destacar que los valores máximos de RIWP en los grados de impermeabilidad III y IV son mayores que el valor máximo de RIWP en el grado V.



Figura 5.2.16.- Gráfica comparativa del grado de impermeabilidad asignado por el CTE frente al valor RIWP obtenido

5.3.- Mapas de exposición a la lluvia batiente y a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente de España

El análisis de los resultados obtenidos en las estaciones meteorológicas estudiadas en este proyecto, sumado a los logrados en estudios anteriores en el resto del territorio español a excepción de Canarias (debido a las particularidades de su clima y topografía), ha dado como resultado dos mapas de exposición en la Península Ibérica (menos el territorio portugués), de las Islas Baleares, de Ceuta y de Melilla.

Ambos se han realizado mediante el programa Allplan BIM 2016, cargando los valores de exposición en las coordenadas UTM de cada estación, y procediendo a la triangulación de valores y consecución de curvas de nivel.

En primer lugar, un mapa que caracteriza la exposición a la lluvia batiente mediante el indicador Annual Driving Rain Index, basado en registros diarios (daDRI) con unidades de metro cuadrado por segundo (m^2/s).

El mapa de caracterización de la exposición a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente se realiza a través del indicador Driving-Rain Wind Pressure, basado en registros diarios (dDRWP) en pascales [Pa].

La incorporación de la componente direccional en los cálculos ejecutados con los registros recopilados en las estaciones meteorológicas situadas en Andalucía, Aragón, Castilla y León, Cataluña, Galicia y Navarra permiten añadir a estos mapas las orientaciones de máxima exposición de los edificios de las diferentes regiones. A pesar de conocer cuál es dicha dirección en todas las estaciones analizadas, únicamente se han añadido unas pocas en ambos mapas con el fin de caracterizar las direcciones de máxima exposición en los territorios estudiados, pero siempre con la mayor legibilidad posible.

Cabe destacar a la hora de examinar estos mapas, que las direcciones que se observan en ellos son la orientación de fachada más expuesta, es decir, que la lluvia

*Incorporación de una caracterización direccional
para la estimación detallada del riesgo de
penetración de humedad en fachadas españolas*

batiente o la presión eólica simultánea a la misma actúan, por tanto, en la dirección opuesta a la señalada por la flecha en el mapa.

5.3.1.- Mapa de exposición a la lluvia batiente

En el mapa de exposición a la lluvia batiente se han situado curvas de nivel con un rango de 1 (m^2/s) cada una.

A simple vista, contemplamos un menor número de curvas de nivel en el sur de la Meseta Central, lo que corresponde a una mayor homogenización de los climas en esa zona. Observamos también como las zonas con mayor cantidad de curvas de nivel aparecen en las zonas del mar Cantábrico y Galicia, habiendo grandes cambios entre ubicaciones muy próximas. En Galicia, las borrascas tienden a realizar un giro antihorario antes de entrar en el territorio que queda muy definido por las orientaciones de máxima exposición en esta zona.

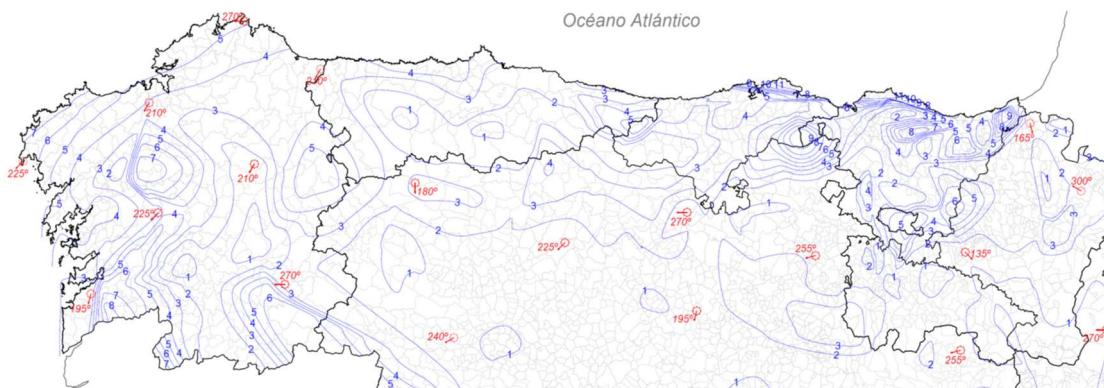


Figura 5.3.1.- Zona noroeste del mapa de exposición daDRI elaborado

La Comunidad Valenciana y las Islas Baleares sufren muy poca variación en su clima a lo largo de todo su territorio. En la costa catalana se puede observar la presencia de vientos costeros que soplan hacia el interior de Cataluña. En el Valle del Ebro, resulta notoria la presencia del cierzo, siendo las fachadas con orientaciones hacia el noroeste aquellas que sufren una mayor exposición a la lluvia batiente en esta zona.



Figura 5.3.2.- Fracción del Valle del Ebro
en el mapa de exposición daDRI elaborado

Entre las estaciones analizadas en este estudio, aquella con una mayor exposición a la lluvia batiente es la estación meteorológica Cabo Vilán con un valor de 7,482 (m^2/s), establecida en el cabo con el mismo nombre, ubicada en la Costa de la Muerte, perteneciendo al municipio de Camariñas, La Coruña. Sin embargo, la estación con menor exposición es la de La Seu D'Urgell con un valor de 0,126 (m^2/s), localizada en el municipio del mismo nombre de la provincia de Lérida y que, curiosamente, se encuentra en los Pirineos catalanes.



Figura 5.3.3- Mapa de exposición a la lluvia batiente elaborado para España

*Incorporación de una caracterización direccional
para la estimación detallada del riesgo de
penetración de humedad en fachadas españolas*

5.3.2.- Mapa de exposición a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente

El mapa de exposición a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente contiene, con carácter general, un mayor número de curvas de nivel, con un rango de 2 (Pa), que el de exposición a la lluvia batiente.

En la comunidad autónoma de Castilla y León la densidad de curvas de nivel es muy elevada, hecho que pone de manifiesto la necesidad de analizar una gran cantidad de emplazamientos para caracterizar la exposición de forma adecuada, dada la rápida variabilidad de condiciones en una zona geográfica relativamente pequeña.

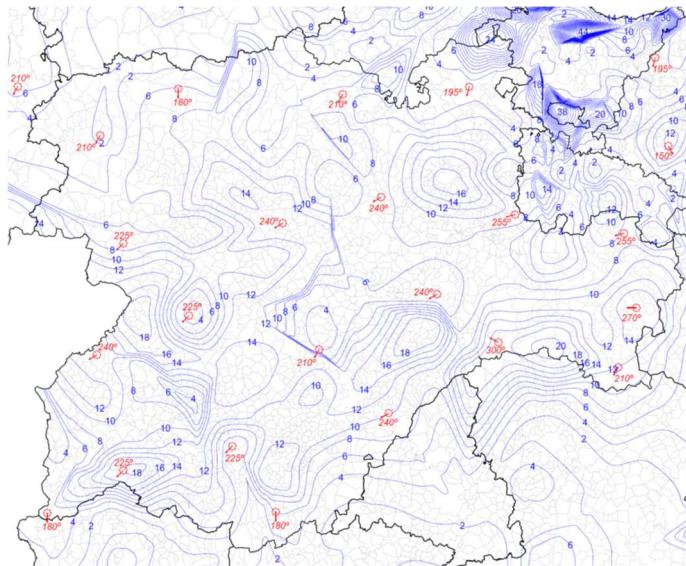


Figura 5.3.4.- Castilla y León en el mapa de exposición dDRWP elaborado

En Galicia, se aprecia, igual que en el mapa de exposición a la lluvia batiente, la rotación antihoraria que realizan las borrascas previa entrada a territorio español. Es interesante el cambio de dirección que se produce a ambos lados del Estrecho de Gibraltar, además de observar unos valores elevados de dDRWP en esa zona.

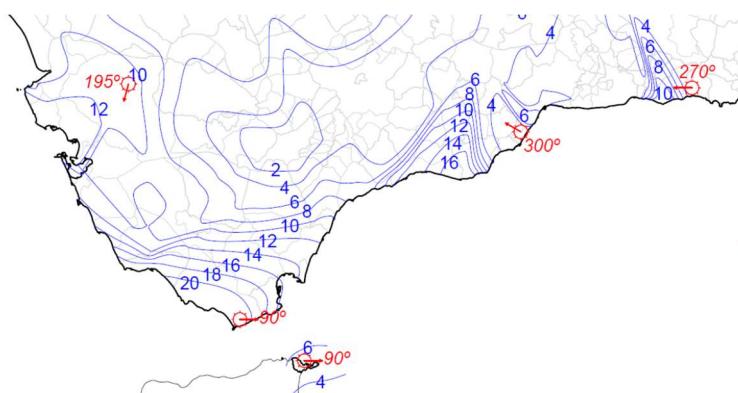


Figura 5.3.5.- Estrecho de Gibraltar en el mapa de exposición dDRWP elaborado

La estación analizada con un mayor de exposición a la presión simultánea a la lluvia batiente se ubica en el municipio Mañón, en la estación meteorológica de Estaca de Bares, situada en el cabo con el mismo nombre, con un valor dDRWP de 54,314 (Pa). Esta estación con el registro máximo se localiza, igual que en el caso de lluvia batiente, en la provincia de La Coruña, Galicia. Sin embargo, la estación con menor exposición se encuentra en este caso en la provincia de Málaga (Andalucía), en la localidad de Cortes de la Frontera, con un valor dDRWP de tan sólo 0,270 (Pa). El segundo valor mínimo de dDRWP se ubica en la misma estación (La Seu D'Urgell) que registra el menor valor de exposición daDRI, siendo, por tanto, la localidad menos expuesta de todas las analizadas.

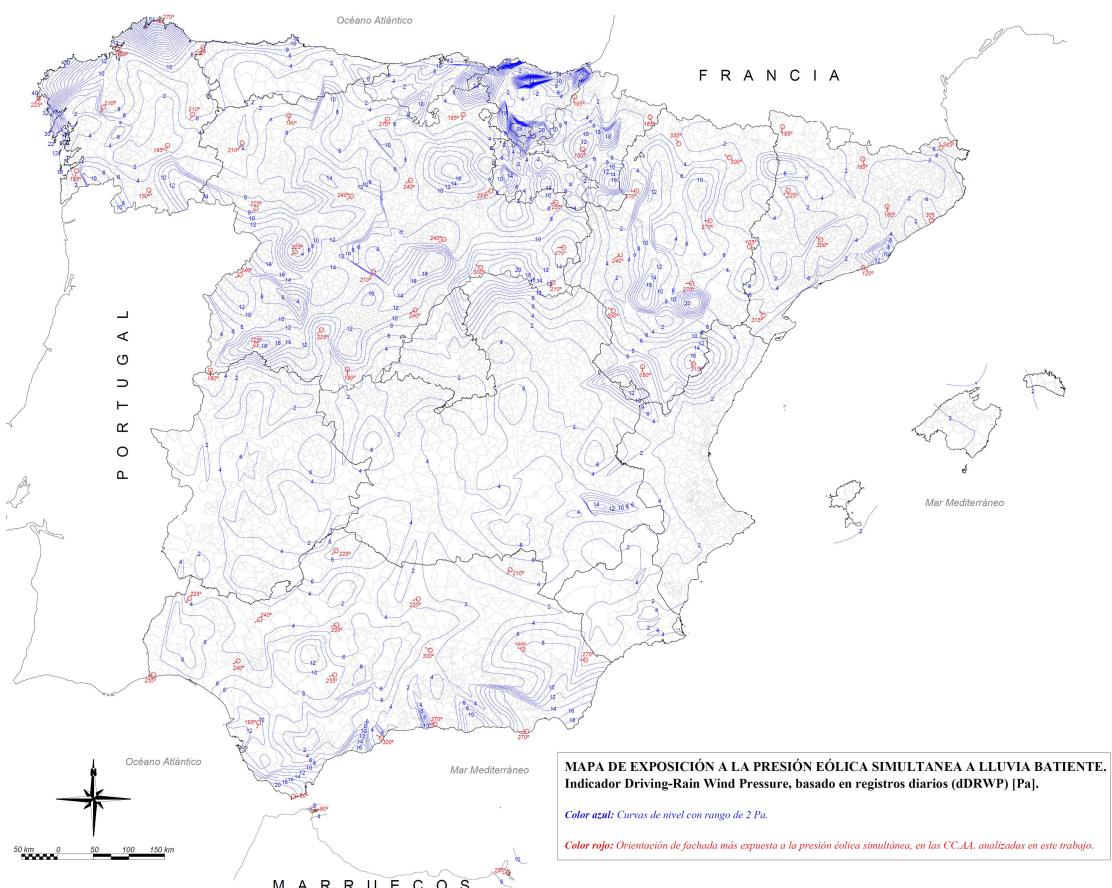


Figura 5.3.6- Mapa de exposición a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente elaborado para España

5.3.3.- Comparación de los mapas de exposición obtenidos en este estudio con los previamente elaborados para España

El estudio citado en la Introducción de este proyecto, Procedure for a detailed territorial assessment of wind-driven rain and driving-rain wind pressure and its implementation to three Spanish regions [8], logró como resultado mapas de exposición escalar a la lluvia batiente y a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente en las comunidades autónomas de Andalucía, Cataluña y Galicia.

En el primero de estos mapas, se muestra la exposición a través del indicador Annual Driving Rain Index, basado en datos diarios (daDRI) en metros cuadrados por segundo y, en el segundo, mediante el indicador Driving-rain Wind Pressure Index, basado en datos diarios (dDRWP) en Pascales.

Por tanto, en el estudio que caracterizó el riesgo de penetración de humedad en las fachadas de Andalucía, Cataluña y Galicia se implementaron el mismo tipo de mapas que los que se han conseguido en este proyecto, permitiendo una comparación entre ellos.

Cabe recordar, a pesar de haber sido mencionado en la Introducción, que aquel estudio utilizó la metodología similar a la utilizada en este proyecto (utilizando mapas de viento en vez de registros direccionales del viento). Contó con datos diarios únicamente en Andalucía, mientras que tuvo que usar registros mensuales en las comunidades de Cataluña y Galicia combinados con regresiones estadísticas, lo que hacen que sus resultados sean menos fiables.

Además, los mapas de exposición implementados en este proyecto añaden la orientación de la fachada más expuesta a cada fenómeno en varios emplazamientos de cada comunidad autónoma analizada en él, consiguiendo una caracterización direccional de ambas exposiciones.

En Andalucía, el uso de registros climáticos diarios combinados con mapas de viento consiguió una aproximación muy cercana en el mapa de exposición a la lluvia batiente de esta comunidad en el estudio anterior al mapa elaborado en este proyecto, añadiendo mayor exposición en el Estrecho de Gibraltar del que se ha calculado en este proyecto. Las diferencias observadas pueden deberse a la carencia en el estudio de otros datos referidos a estaciones en las CCAA cercanas, así como de Ceuta y Melilla y a los diferentes años de registros considerados.

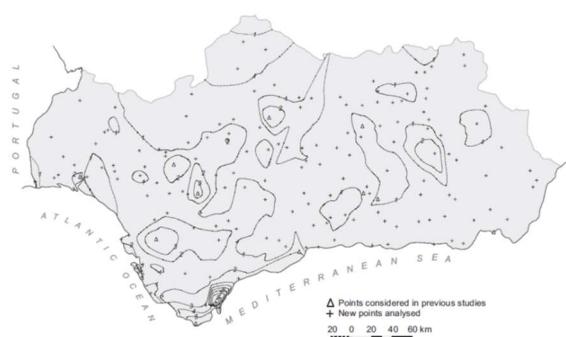


Figura 5.3.7.- Mapa de exposición daDRI para Andalucía previamente existente

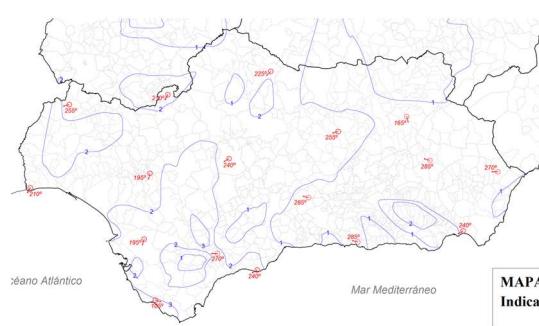


Figura 5.3.8.- Mapa de exposición daDRI para Andalucía realizado en este proyecto

Los mapas de exposición a la presión eólica a la lluvia batiente en Andalucía, a excepción de los valores obtenidos en la zona suroeste de esta comunidad, bastante más elevados en el obtenido en el estudio anterior, resultan muy similares teniendo en cuenta los distintos rangos utilizados en las curvas de nivel.

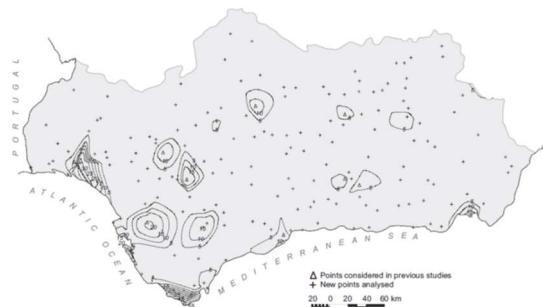


Figura 5.3.9.- Mapa de exposición dDRWP para Andalucía previamente existente

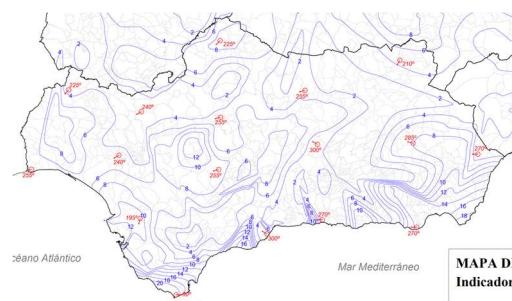


Figura 5.3.10.- Mapa de exposición dDRWP para Andalucía realizado en este proyecto

En el caso de la comunidad autónoma de Cataluña, la utilización de registros mensuales en vez de diarios, la combinación de estos con cálculos estadísticos y mapas de viento dan como resultado del estudio anterior un mapa de exposición a la lluvia batiente con valores no muy lejanos a los calculados en este proyecto.

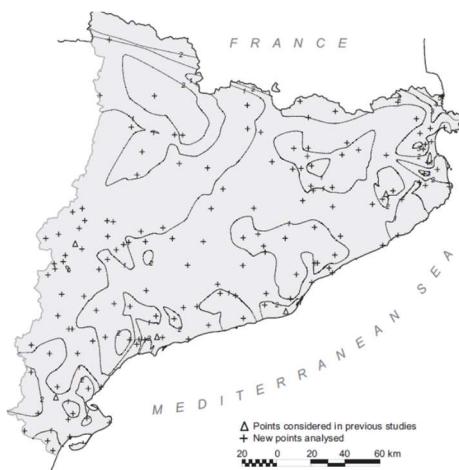


Figura 5.3.11.- Mapa de exposición daDRI para Cataluña previamente existente

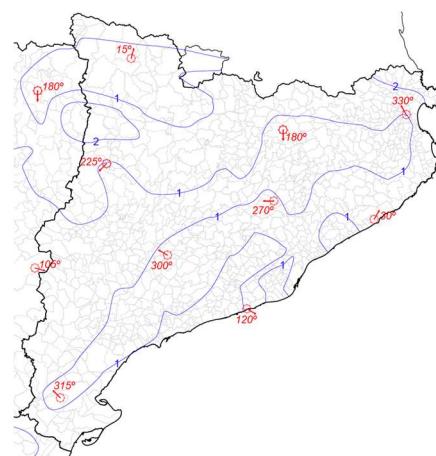


Figura 5.3.12.- Mapa de exposición daDRI para Cataluña realizado en este proyecto

Sin embargo, el mapa de exposición a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente diseñado en el proyecto anterior, muestra valores que difieren en exceso a los calculados en este estudio, especialmente en la zona noreste de Cataluña. La utilización de mapas de viento generalistas en el estudio precedente, en lugar de registros meteorológicos observacionales, está, sin duda, detrás de estas diferencias.

*Incorporación de una caracterización direccional
para la estimación detallada del riesgo de
penetración de humedad en fachadas españolas*

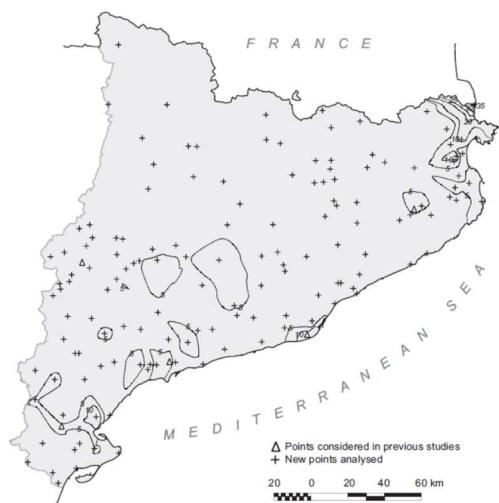


Figura 5.3.13.- Mapa de exposición dDRWP para Cataluña previamente existente

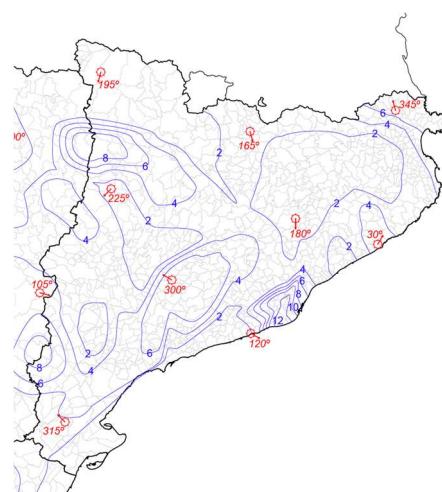


Figura 5.3.14.- Mapa de exposición dDRWP para Cataluña realizado en este proyecto

En Galicia, la exposición a la lluvia batiente en el estudio anterior es mucho mayor de la calculada en este proyecto, obteniendo un mapa de exposición que duplica en ciertas zonas los valores de daDRI.

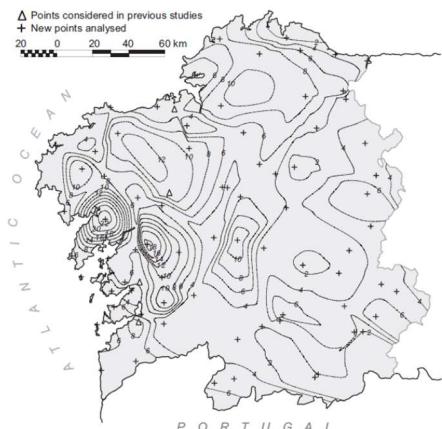


Figura 5.3.15.- Mapa de exposición daDRI para Galicia previamente existente

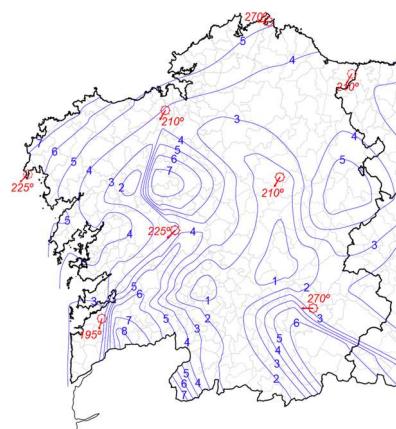


Figura 5.3.16.- Mapa de exposición daDRI para Galicia realizado en este proyecto

En los mapas de exposición a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente en Galicia se aprecia también una gran diferencia entre los valores de ambos. Existen zonas en el mapa obtenido en el proyecto previo con un valor dDRWP mucho mayor al logrado en el presente estudio, mientras que en otras el resultado es el contrario.

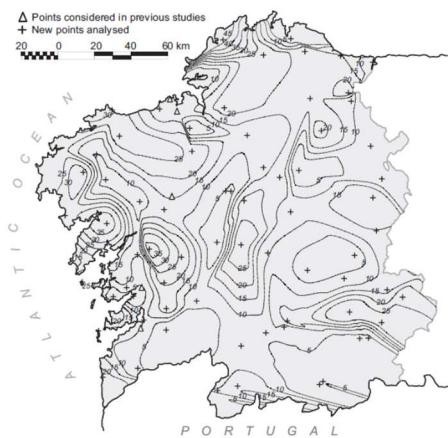
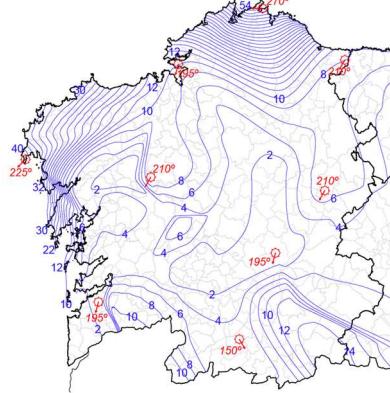


Figura 5.3.17.- Mapa de exposición dDRWP para Galicia previamente existente



6.- Conclusiones

La utilización de procedimientos adaptados a partir de estándares internacionales para determinar la solicitud por humedad de los cerramientos verticales de un edificio (mediante el cálculo de la exposición a la lluvia batiente y a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente en varias comunidades autónomas de España), ha permitido comparar los resultados obtenidos con la estimación del riesgo de penetración de agua en las fachadas determinado por el CTE DB-HS1 a lo largo de estos territorios.

Esta comparación ha puesto de manifiesto la posibilidad de introducir mejoras en el Código Técnico de la Edificación tras comprobar que los rangos de solicitud asignados no se corresponden con la verdadera exposición que sufren estos cerramientos en muchos emplazamientos del país. La incorrecta estimación de esta solicitud incluye la consecuencia de determinar inapropiadamente un grado de impermeabilidad mínimo exigido para las fachadas de un edificio, pudiendo concluir el estudio con una inadecuada asignación de soluciones constructivas, con los graves riesgos que esto conlleva.

El análisis de estos resultados implica cuestionarse la necesidad de revisar los parámetros que actualmente estudia el CTE DB-HS1 a la hora de estimar la solicitud de humedecimiento sobre las fachadas. Los valores de índices de exposición a lluvia batiente daDRI y a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente dDRWP se han utilizado en este proyecto para sustituir estos parámetros, con el fin de obtener una asignación real y conveniente en cada caso, contribuyendo así para que en el futuro se puedan optimizar los recursos empleados en la construcción de cerramientos, aumentar la durabilidad de las edificaciones y proteger la salud de sus ocupantes.

Se han realizado mapas de exposición a la lluvia batiente y a la presión eólica simultánea a ésta que se podrían implementar directamente en el CTE DB-HS1, sustituyendo los mapas zonales de pluviometría y viento presentes en él, para obtener un grado de impermeabilidad requerido más prestacional.

La caracterización direccional de la solicitud por humedad de las fachadas y las correlaciones obtenidas entre el máximo valor direccional y el valor medio escalar de los índices de exposición a la lluvia batiente y a la presión eólica simultánea a la misma permite determinar la exposición máxima a soportar en cualquier orientación posible de la fachada, estudiando únicamente el valor escalar de estos índices y evitando, por tanto, la realización de los laboriosos cálculos necesarios para determinar la componente direccional de estos parámetros.

La obtención de relaciones entre los distintos índices de exposición analizados en diferentes intervalos de tiempo, permite añadir emplazamientos que no cuenten con datos diarios suficientes para su estudio a esta caracterización de la estimación del riesgo de penetración de humedad en fachadas.

La utilización de datos horarios o diezminutales en lugar de diarios abriría la posibilidad de realizar una estimación de la solicitud más precisa de los territorios analizados en el presente proyecto, pudiéndose añadir a éste el análisis de los registros climáticos recopilados en Portugal para obtener una caracterización de toda la Península Ibérica. El uso de los nuevos parámetros propuestos en el proyecto implica un reto para las instituciones implicadas en el desarrollo normativo para la construcción española, que también deberán colaborar con el fin de minimizar los riesgos de penetración de humedad en los cerramientos verticales, optimizando la asignación de soluciones aceptables para los distintos grados de impermeabilidad requeridos.

7.- Bibliografía

- [1] Pérez-Bella, J.M., Domínguez-Hernández, J., Rodríguez-Soria, B., del Coz-Díaz, J.J., Cano-Suñén, E. (2015). Revisión y mejora de la caracterización del grado de impermeabilidad requerido por el CTE DB-HS1 para fachadas de edificación. *Informes de la Construcción*, 67(537): e059.
- [2] Pérez-Bella, J.M., Domínguez-Hernández, J., Rodríguez-Soria, B., del Coz-Díaz, J.J., Cano-Suñén, E. (2014). Aplicación al código técnico de la edificación de avances en el estudio de la exposición a la humedad de fachadas. *Revista Dyna* 89, 440-448.
- [3] Broto, C. (2006). Enciclopedia Broto de las patologías de la construcción. Barcelona: Links Barcelona, S.A
- [4] Blocken, B., Carmeliet, J., 2004. A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92 (13), 1079-1130.
- [5] España. Real Decreto 314/2006 por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Boletín Oficial del Estado, 29 de marzo de 2006, núm. 74, p. 11816.
- [6] CEN. (2009) Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data. EN ISO 15927-3. Bruselas: European Committee for Standardization.
- [7] BSI. (1992). Code of practice for assessing exposure of walls to wind-driven rain. BS 8104. Londres: British Standards Institution.
- [8] AENOR. (2011). Comportamiento higrotérmico de los edificios - Cálculo y presentación de datos climáticos. Parte 3: Cálculo de un índice de lluvia para superficies verticales a partir de datos horarios de viento y lluvia. UNE-EN ISO 15927-3. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.
- [9] Pérez-Bella, J.M., Domínguez-Hernández, J., Rodríguez-Soria, B., del Coz-Díaz, J.J., Cano-Suñén, E., Martín-Rodríguez, A. (2014). Procedure for a detailed territorial assessment of wind-driven rain and driving-rain wind pressure and its implementation to three Spanish regions *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 128: 76-89.
- [10] Agencia Estatal de Meteorología, datos recibidos el 11 de diciembre de 2017 previa solicitud.
- [11] Kotttek, M., Grisier, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* 15, 259-263.
- [12] Instituto Geográfico Nacional, consultado el 15 de agosto de 2018.
- [13] CEN. (2001). EN 12865:2001. Hygrothermal performance of building components and building elements. Determination of the resistance of external wall systems to driving rain under pulsating air pressure. European Committee for Standardization.
- [14] ASTM. (2009). ASTM E331-00. Standard test method for water penetration of exterior windows, skylights, doors, and curtain walls by uniform static air pressure difference. American Society of Testing and Materials.
- [15] Cornick SM, Lacasse MA. (2006) A review of climate loads relevant to assessing the watertightness performance of walls, Windows, and wall-window interfaces. *Journal of ASTM International*. 2005. Vol.2-10 p.1-16.
- [16] Teoría de los valores extremos (s.f.). En Wikipedia, consultado el 8 de junio de 2018.

*Incorporación de una caracterización direccional
para la estimación detallada del riesgo de
penetración de humedad en fachadas españolas*

- [17] Catala, F. (1992). Cálculo de Caudales en las redes de saneamiento. Madrid, SPA: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Demarcación Centro. ISBN 84-600-7282-7.
- [18] Período de retorno (s.f.). En Wikipedia, consultado el 8 de junio de 2018.
- [19] Distribución de Gumbel (s.f.). En Wikipedia, consultado el 8 de junio de 2018.
- [20] Pérez, J.M., Domínguez, J., Rodríguez, B., Cano, E., del Coz, J. J. & Alonso, M (2013). Global analysis of building façades exposure to water penetration in Chile. *Building and Environment*, 70, 284-297.
- [21] Akingbade, F. O. A. (2004): Estimation of Driving Rain Index for Nigeria, *Architectural Science Review*, 47:2, 103-106
- [22] Chand, I., & Bhargava, P. K. (2002). Estimation of driving rain index for India. *Building and Environment*, 37, 549-554.
- [23] Pérez, J.M., Domínguez, J., Rodríguez, B., del Coz, J. J. & Alonso, M, & Cano, E. (2016). Assesment of water penetration risk in building facades throughout Brazil. *Building Research & Information*, 45, 492-507.