



Trabajo Fin de Máster

Cálculo de lluvia batiente anual y máxima de referencia en fachadas españolas: ISO 15927-3 y comparación con otros índices simplificados.

Wind-driven rain calculation on Spanish facades:
application of Standard ISO 15927-3 and its comparison
with other simplified indices.

Autor

Jorge Castillo Fernández

Director

José María Pérez Bella

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2019

Cálculo de lluvia batiente anual y máxima de referencia en fachadas españolas: ISO 15927-3 y comparación con otros índices simplificados

RESUMEN

La filtración de las precipitaciones atmosféricas en las fachadas puede causar graves problemas en los edificios y a las personas que los habitan. Para evitar estos problemas, en España se ha definido un índice de referencia que pretende caracterizar la exposición de las fachadas frente a la penetración de humedad, lo que permite realizar una clasificación de las zonas más expuestas.

La definición de este índice, denominado “grado de impermeabilidad”, se establece en el Documento Básico HS1 Salubridad recogido en el Código Técnico de la Edificación. Para ello se analizan dos parámetros climatológicos distintos: la pluviometría media anual y la velocidad básica del viento o velocidad máxima que podrá registrarse durante 10 minutos en los próximos 50 años.

Para analizar la validez de la metodología propuesta en el CTE, en este trabajo se ha realizado una estimación detallada del riesgo de penetración de humedad en las fachadas españolas, utilizando para ello procedimientos internacionalmente aceptados, basados en registros distintos a los considerados por el Código Técnico español.

Algunos de los procedimientos más utilizados internacionalmente, como el Driving Rain Index (aDRI), proporcionan índices simplificados basados en datos simultáneos diarios, mensuales o anuales de precipitaciones y viento. Otros, como la norma ISO 15927-3 (UNE-EN ISO 15927-3), se basan en registros meteorológicos horarios para determinar la exposición de las fachadas de los edificios a la lluvia batiente. La tradicional carencia de registros meteorológicos horarios de suficiente antigüedad ha impedido sistemáticamente aplicar esta norma aunque la progresiva implantación de estaciones automáticas permite en la actualidad empezar a soslayar este problema.

En este trabajo se recopilan registros meteorológicos horarios de diversas estaciones automáticas españolas (EMAs) implantadas antes de 2008. Usando la formulación presente en la norma ISO 15927-3, se determina la exposición media anual de dichos emplazamientos a la lluvia batiente en fachadas, así como su exposición máxima asociada a períodos de humedecimiento concretos. Utilizando una herramienta BIM, se elaboran mapas de exposición relativos a las regiones analizadas.

Por último, los resultados se comparan con los obtenidos previamente mediante otros indicadores simplificados (como el índice aDRI) y con el grado de impermeabilidad exigido actualmente por el CTE-DB HS1 para esas zonas. De este modo se consigue validar la fiabilidad real de las caracterizaciones alternativas que se han venido dando por válidas hasta el momento.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVO	10
3. ALCANCE	11
4. METODOLOGÍA	14
4.1. <i>Cálculo de la lluvia batiente</i>	14
4.2. <i>Cálculo de la I'_s máxima asociada a un periodo de retorno.....</i>	16
4.3. <i>Extracción y depuración de datos</i>	17
4.4. <i>Ánalisis de datos y creación de fichas resumen</i>	18
5. RESULTADOS	23
5.1. <i>Hoja resumen simplificada.....</i>	23
5.2. <i>Mapas de exposición climática</i>	25
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	29
6.1. <i>I_A escalar vs Máxima I_A direccional.....</i>	29
6.2. <i>I_A escalar vs Pluviometría</i>	31
6.3. <i>Máxima I_A direccional vs Máxima I_S direccional</i>	32
6.4. <i>Grado de impermeabilidad vs I_A escalar.....</i>	34
6.5. <i>Máxima I_A direccional vs Máxima I_S direccional</i>	35
7. CONCLUSIONES.....	38
8. BIBLIOGRAFÍA.....	41
9. ANEXOS	43

1. INTRODUCCIÓN

El humedecimiento y la penetración del agua atmosférica en los cerramientos de las edificaciones conllevan graves consecuencias sobre la habitabilidad, salubridad y seguridad de los edificios, al mismo tiempo que reducen su durabilidad, disminuyen la capacidad de aislamiento de los materiales e incrementan los costes energéticos derivados de los mismos.

La necesidad de limitar el riesgo de presencia de agua o humedad en el interior de los edificios se introdujo por primera vez en España mediante una exigencia básica del Código Técnico de la Edificación (CTE): el Documento Básico HS1 Salubridad (CTE DB-HS1) aprobado en 2006. La nueva exigencia supuso un gran avance en este campo debido a la inexistencia de regulación previa. Este documento establece la necesidad de limitar el riesgo previsible de presencia inadecuada de agua o humedad en los cerramientos del edificio, determinando las condiciones de diseño que deben cumplir las fachadas de acuerdo a la solicitud por humedad atmosférica estimada sobre ellas y estableciendo un grado de impermeabilidad mínimo requerido para estos cerramientos verticales [1].

Por ello, evaluar la exposición de las fachadas frente a la penetración de humedad atmosférica constituye un requisito necesario para garantizar el posterior cumplimiento de la exigencia básica de protección frente a la humedad que se recoge en el CTE. La determinación adecuada de esta solicitud, es por tanto un parámetro clave para garantizar la prestación de la solución constructiva asignada y con ello optimizar su diseño [2].

Aplicando el CTE, el grado de impermeabilidad se calcula como una combinación de la pluviometría media anual y un valor de referencia de viento (velocidad básica). Para determinar ambos valores se utilizan dos mapas climáticos zonales que definen cada uno de los parámetros y una tabla que los combina asignando el grado de impermeabilidad (escala 1-5). Así, la pluviometría media se asigna a partir de la división territorial mostrada en el siguiente mapa.

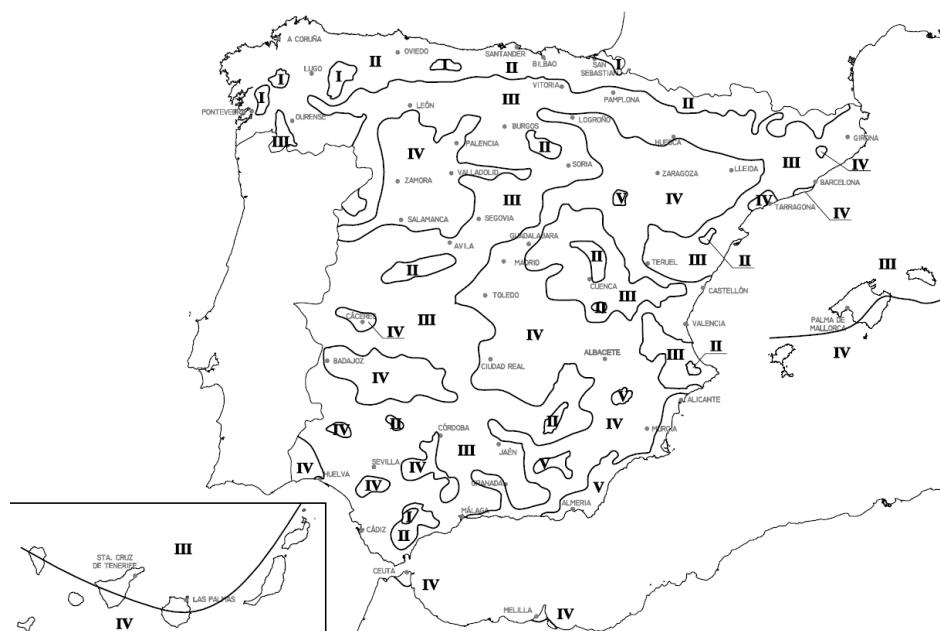


Figura 1.1. – Zonas pluviométricas de promedios

El segundo de los parámetros es el valor básico de velocidad del viento o valor de la velocidad de viento que, registrado en un intervalo de 10 minutos, se espera que sea superado de media una vez cada 50 años. Es decir, aquél que se repite con un periodo de retorno de 50 años. La combinación de una asignación zonal basada en este valor (zonas A, B o C), con la altura del edificio y con la clase de terreno en su entorno (E0 para zonas llanas y despejadas o E1 para zonas urbanas, industriales y forestales), determina el grado de exposición al viento (V1, V2 o V3) al que el cerramiento habrá de hacer frente [3-4].

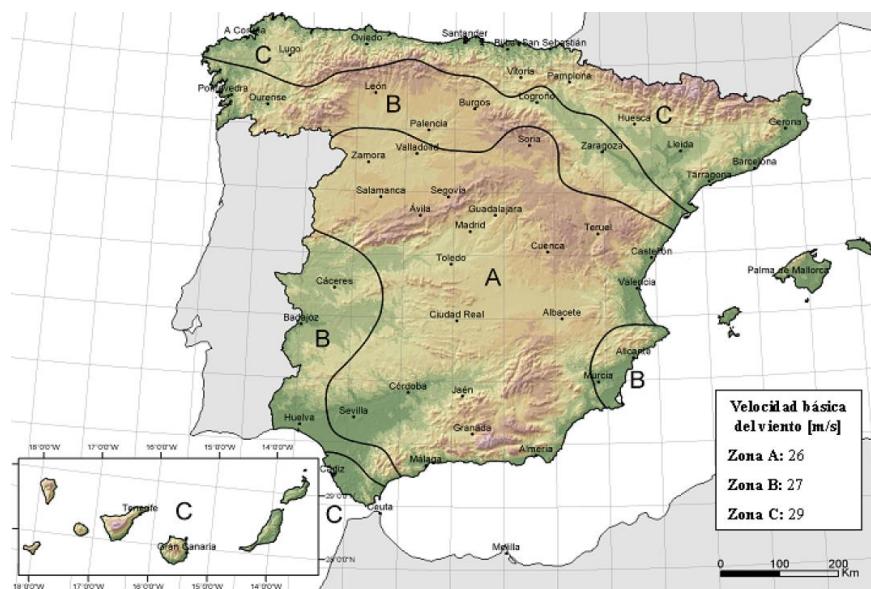


Figura 1.2. – Zonas eólicas

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

Figura 1.3. – Asignación del grado de exposición al viento

La combinación de ambos parámetros en la siguiente tabla permite determinar el grado de impermeabilidad requerido en cada situación. Cuanto mayor sea el grado de impermeabilidad, más exigentes son las soluciones constructivas que se prescriben.

		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. – Grados de impermeabilidad mínimos requeridos

A pesar de la inclusión de este procedimiento en la normativa vigente de obligado cumplimiento, existen estudios que ponen de manifiesto la necesidad de revisar los parámetros utilizados para fijar el grado de impermeabilidad, con el objetivo de alcanzar una mayor prestacionalidad normativa y mejorar la asignación de los diseños de fachada necesarios.

Así, los dos parámetros climáticos en los que se apoya el DB-HS1 (pluviometría media anual y velocidad básica del viento) quizás no cuantifiquen la cantidad de agua atmosférica recibida por los cerramientos verticales de manera idónea. El resultado obtenido puede caracterizar inadecuadamente el grado de solicitud existente, provocando la asignación de soluciones constructivas para las fachadas que no se ajusten a la exigencia climática real (por exceso al utilizar más recursos de los necesarios o por defecto al producirse humedad indeseada).

El humedecimiento de los cerramientos verticales se debe fundamentalmente a la combinación simultánea de precipitaciones atmosféricas y de rachas de viento. La acción del viento desvía la trayectoria vertical de las gotas de agua durante las precipitaciones, siendo la responsable del aporte de agua sobre la superficie vertical de las fachadas. Este fenómeno que combina precipitaciones y viento se denomina lluvia batiente (Wind-Driven Rain o WDR) [5].

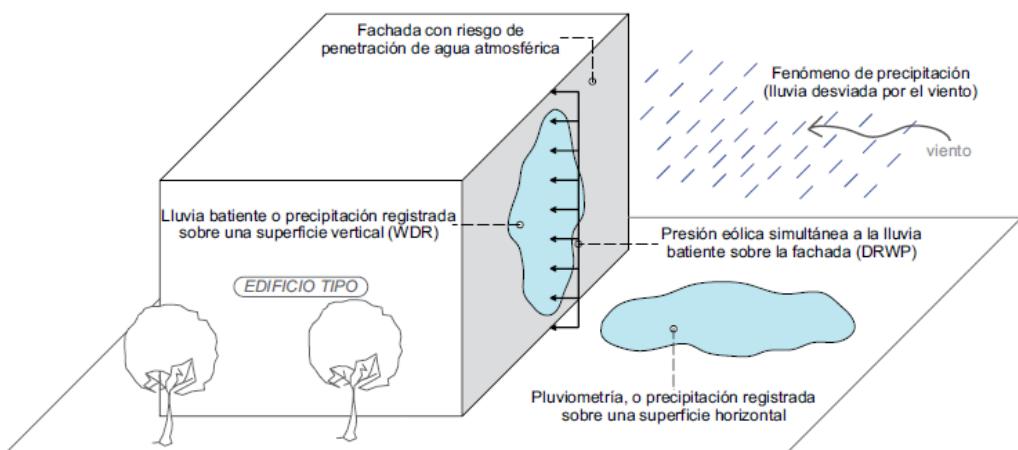


Figura 1.5. – Lluvia desviada sobre la fachada por la acción simultánea de viento

El procedimiento para cuantificar la lluvia batiente recibida por las fachadas quedó normalizado en 2009 con la aprobación del estándar internacional ISO 15927-3, inspirado en un estándar británico previo. La transposición del estándar internacional al ámbito español se realizó en 2011 mediante la norma UNE-EN ISO 15927-3. Desde entonces se han desarrollado varios estudios dirigidos a cuantificar los parámetros WDR en España. 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 de suficiente antigüedad. Estos registros deben ser recopilados en una gran cantidad de emplazamientos y deben tener una antigüedad superior a 10 años (20 o 30 años de registros es lo recomendado).

Para suplir la carencia de los datos horarios, estos estudios recurrieron a aproximaciones internacionalmente reconocidas (como el índice aDRI) que estudian registros meteorológicos diarios adaptados a las particularidades de los datos disponibles. Utilizando las aproximaciones, muchos países han caracterizado las condiciones de exposición a la lluvia batiente de sus cerramientos y valorado de manera aproximada el riesgo de penetración de agua en los mismos.

2. OBJETIVO

Evaluar la exposición de las fachadas a la penetración de humedad atmosférica constituye un requisito necesario para garantizar el cumplimiento de la exigencia básica de protección frente a la humedad en fachadas establecida por el Código Técnico de la Edificación aprobado en 2006.

Sin embargo, con el paso de los años, se han publicado estudios que cuestionan la validez de la metodología formulada en el Código Técnico. Para verificar si existen carencias en esta metodología, la comparación con otras alternativas de determinación de lluvia batiente se considera un requisito indispensable. Los parámetros climáticos expuestos en la legislación actual podrían presentar posibilidades de mejora, siendo necesaria en ese caso una asignación más adecuada del grado de impermeabilidad y con ello, de los requisitos de diseño.

El objetivo de este trabajo es el cálculo y la caracterización de la lluvia batiente según la norma ISO 15927-3 en diferentes emplazamientos del territorio español. Una vez realizada esa caracterización, se pretende comparar los resultados obtenidos con otras metodologías, como la planteada en el CTE o con aproximaciones internacionalmente aceptadas como el Driving Rain Index (aDRI). Estas comparaciones permitirán extraer conclusiones acerca de la validez de las diferentes metodologías y determinarán la necesidad, o no, de revisar los parámetros utilizados en el Código Técnico de la Edificación para fijar el grado de impermeabilidad. El análisis de los resultados tendrá como objetivo final alcanzar una mayor prestacionalidad normativa y mejorar la asignación de los diseños de fachada necesarios en cada situación.

El ámbito de estudio se centra en las comunidades autónomas de Galicia e Islas Canarias. Las dos comunidades presentan climas contrapuestos, por lo que las conclusiones extraídas se pueden considerar extrapolables a una gran variedad de climas presentes todo el territorio nacional.

Para abordar esta tarea será necesario extraer, filtrar y transformar los datos climáticos horarios para estimar los índices direccionales de lluvia y presión eólica simultánea sobre las fachadas. Además, se elaborarán distintos mapas climáticos de exposición que permitirán comparar las diferentes metodologías de una manera visual y sencilla.

Hasta hace pocos años, la utilización de la metodología propuesta en la norma ISO 15927-3 se veía condicionada en España por la carencia de registros climáticos de carácter horario con antigüedad superior a 10 años. Con el avance de las nuevas tecnologías, el registro de los datos se ha ido simplificando y son ya numerosas las estaciones meteorológicas españolas que conservan los registros horarios desde hace más de una década.

De este modo se pretende realizar una adecuada estimación de la solicitud por humedad en las fachadas españolas, con el fin de adecuar y optimizar el diseño de las soluciones constructivas para los cerramientos.

3. ALCANCE

La escasez de registros horarios con antigüedad superior a 10 años ha sido determinante a la hora de elegir los emplazamientos a estudiar. Aunque algunas comunidades autónomas españolas han utilizado estaciones automáticas y potentes bases de datos donde han registrado su actividad climática desde principios del siglo XXI, hay otras comunidades que no disponían de estas herramientas hasta hace pocos años.

Debido a la gran cantidad de datos a tratar, no era posible analizar en este trabajo todas las estaciones españolas que dispusieran de registros horarios desde hace más de diez años. Es por ello que al comienzo del trabajo se decidió seleccionar dos comunidades autónomas que dispusieran de los datos necesarios y al mismo tiempo fueran representativas de los climas extremos presentes en todo el territorio nacional.

De todas las opciones posibles, las comunidades seleccionadas fueron Galicia e Islas Canarias ya que presentan un gran contraste climático donde quedan representadas las dos situaciones extremas en lo que a condiciones meteorológicas se refiere.

Galicia aparece en su mayor parte incluida dentro del tipo Cs en la clasificación climática de Köppen para indicar, además del carácter templado de su clima, que las precipitaciones son relativamente escasas en verano. Durante los meses invernales, en cambio, éstas suelen ser muy abundantes. Los vientos más ricos en humedad proceden del suroeste y encuentran en la salida de las Rías Baixas un primer obstáculo orográfico. Como consecuencia de ello, la zona más lluviosa de Galicia se extiende desde Fisterra hasta Vigo, en una semicircunferencia que termina en Santiago. Dentro del área mencionada se superan los 1.750 mm anuales, con zonas de más de 2.500 mm. Por el contrario, al este de la dorsal central de Galicia, con la excepción de las comarcas montañosas orientales, la precipitación se reduce notablemente, con valores inferiores a los 1.000 mm anuales en los puntos donde el efecto de la sombra pluviométrica resulta más acusado [6-7].

Las Islas Canarias se encuentran en la zona de transición entre el clima templado y el tropical. Debido a sus condiciones climáticas, es muy difícil definir un clima específico ya que dependiendo de la isla en la que nos encontremos, y la zona de ésta, se podrán identificar diferentes características climáticas. Es por ello, que la palabra más nombrada a la hora de hablar del clima canario es la de microclimas. A grandes rasgos, se puede decir que el clima de las Islas se caracteriza por unas precipitaciones muy escasas e irregulares, especialmente en las zonas bajas (menos de 300 mm), debido al predominio del Anticiclón de Las Azores. En las zonas de medianías, las precipitaciones pueden llegar a los 1.000 mm en las vertientes de barlovento expuestas a los vientos alisios húmedos y constantes, mientras que en las vertientes de sotavento esta cantidad pluviométrica se reduce considerablemente debido a la desaparición del mar de nubes. En la zona de cumbres, principalmente en las islas de mayor altitud, los vientos alisios dejan de hacer efecto, y las precipitaciones se sitúan en torno a los 400 mm, presentándose en algunas ocasiones en forma de nieve [8].

Los datos meteorológicos utilizados en este trabajo han sido extraídos de las páginas web de Meteogalicia [9] y Gobiernodecanarias [10], instituciones dependientes de los gobiernos autonómicos. Los datos recopilados para la realización de este trabajo están compuestos por los registros simultáneos de pluviometría, velocidad y dirección de viento de todas las estaciones seleccionadas en el periodo de 2008 hasta 2018. Los fenómenos climatológicos estudiados han sido recopilados en dos tipos de registros diferentes:

- El primero se refiere a las precipitaciones e indica la cantidad de agua acumulada en una superficie horizontal. Los datos obtenidos se expresan en mm o l/m². Todas las horas en las que había algún dato vacío o erróneo, se han considerado nulas, asignando 0 mm de precipitación.
- El segundo registro analizado es el viento, expresando su velocidad en m/s y su dirección en grados (dos variables por lo tanto). De la misma manera que con las precipitaciones, se han descartado las horas que no presentaban datos válidos.

A pesar de que las comunidades seleccionadas cuentan con un gran número de estaciones meteorológicas, la recopilación de datos presenta habitualmente interrupciones y falta de datos en los registros como consecuencia de reparaciones, paradas de mantenimiento de los equipos, averías o fallos electrónicos. Para minimizar estos errores, dentro de cada comunidad se eligió un número determinado de estaciones a analizar. Los requisitos establecidos fueron: una amplia dispersión territorial en cada comunidad y una falta de datos inferior al 20 %. Siguiendo estos criterios, el número de estaciones analizadas ha sido 40 en el caso de Galicia y 7 en el caso de las Islas Canarias.

De acuerdo a la dispersión geográfica buscada, las estaciones gallegas analizadas están repartidas entre sus cuatro provincias: La Coruña, Lugo, Orense y Pontevedra. En el siguiente mapa se pueden ver la distribución geográfica de las estaciones seleccionadas.

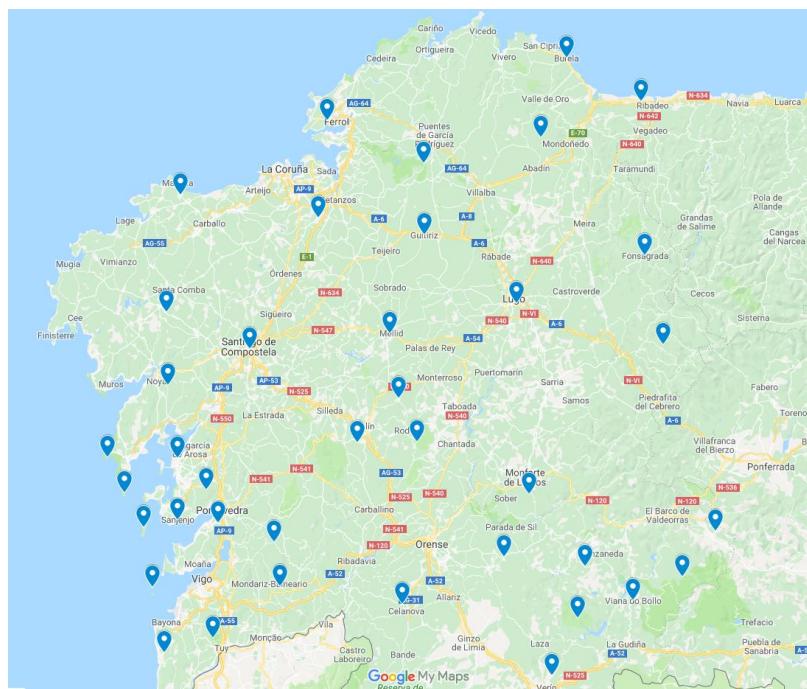


Figura 3.1. – Distribución geográfica de las estaciones gallegas seleccionadas

Las estaciones canarias analizadas están ubicadas en tres de sus islas más orientales, concretamente en Lanzarote, Gran Canaria y Tenerife. Las estaciones situadas en las islas de El Hierro, La Palma, La Gomera, Fuerteventura, etc. no han superado los requisitos establecidos para su consideración en este estudio.

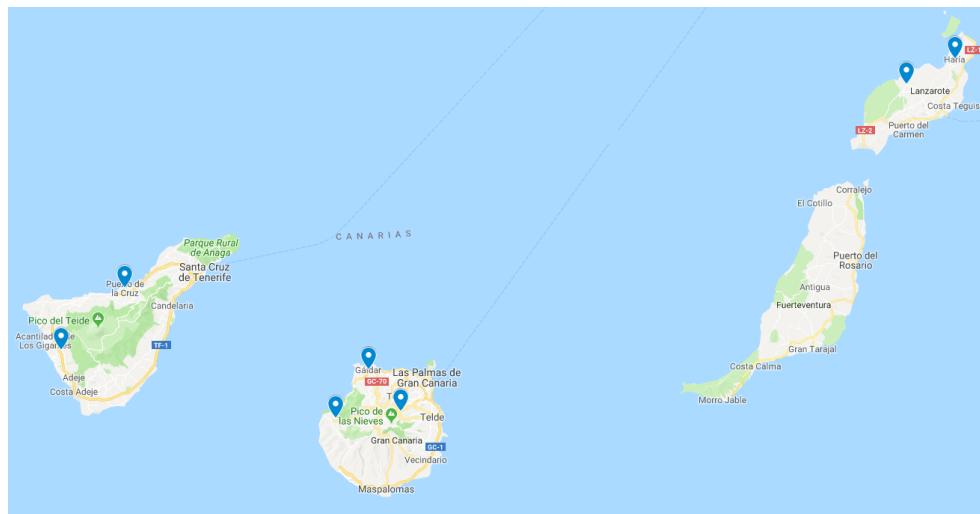


Figura 3.2. – Distribución geográfica de las estaciones canarias seleccionadas

4. METODOLOGÍA

El impacto del agua atmosférica sobre las fachadas se produce por la combinación simultánea de precipitación y la acción del viento sobre las gotas de lluvia. La norma internacional ISO 15927-3 (UNE-EN ISO 15927-3) establece un procedimiento de cálculo de lluvia batiente basado en datos horarios simultáneos de viento (velocidad y dirección) y de lluvia (intensidad de precipitación).

A pesar de que la exhaustividad y antigüedad de los datos requeridos (horarios y recopilados durante al menos 10 años) haya impedido la generalización en el uso de esta norma, la progresiva implantación de estaciones meteorológicas automáticas desde inicios de este siglo, permite ahora contar con suficientes registros como para proceder a esta caracterización en algunas regiones de nuestro país [11].

En este apartado se explica el proceso seguido para caracterizar el valor direccional de la lluvia batiente siguiendo la norma citada anteriormente y se detallan los pasos seguidos para la obtención de los resultados.

4.1. Cálculo de la lluvia batiente

La norma UNE-EN ISO 15927-3 utiliza registros horarios simultáneos de precipitación y de velocidad-dirección de viento para calcular la exposición a la lluvia batiente o Wind-Driven Rain (WDR) en cada emplazamiento. Estos datos de viento deben registrarse en condiciones de referencia, fijadas a 10 m de altura sobre terreno llano y libre de obstáculos.

Así, la lluvia batiente anual de referencia I_A [$\text{l}/\text{m}^2 \text{ año}$] que impacta sobre una fachada con orientación θ [$^\circ$] puede obtenerse mediante la siguiente ecuación [12]:

$$I_A = \frac{2}{9} \cdot \frac{\sum \nu \cdot r^{\frac{8}{9}} \cdot \cos(D - \theta)}{N}$$

Donde r [l/m^2] representa la intensidad de lluvia registrada, ν [m/s] la velocidad del viento y D ($^\circ$) su dirección. Gracias al multiplicador coseno, en el sumatorio sólo consideran aquellos registros horarios en los que la dirección del viento D impulsa a la lluvia sobre la orientación de fachada analizada θ . Así, es necesario realizar un análisis diferenciado para cada una de las posibles orientaciones de fachada en cada emplazamiento analizado.

Para poder aplicar correctamente este cálculo, la norma considera necesario contar con registros climáticos referidos a un número mínimo de $N \geq 10$ años.

En la siguiente figura se indica cómo debe impactar la lluvia sobre la fachada para que se pueda registrar lluvia batiente. Para que ello ocurra, es necesaria la acción del viento con una determinada orientación que desvíe las gotas de lluvia verticales hacia la fachada de orientación seleccionada [4].

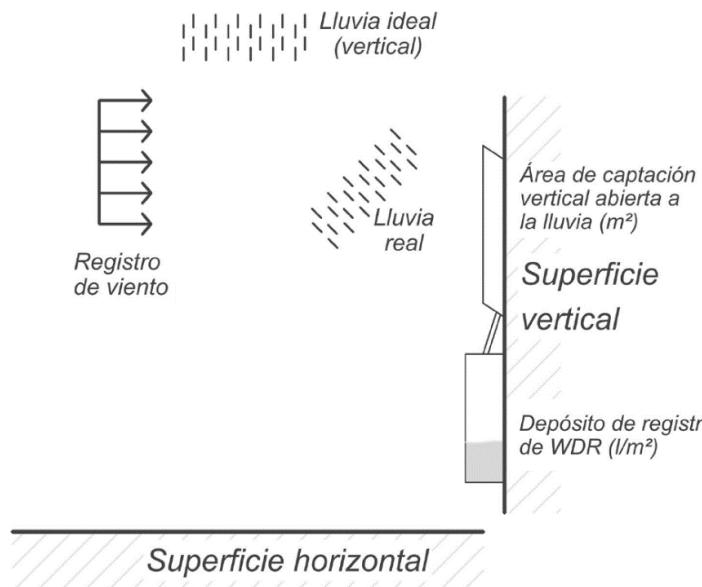


Figura 4.1. – Esquema básico de lluvia batiente e instrumental necesario para su registro

No obstante, aunque el promedio de aporte anual de agua sobre una fachada sea bajo o moderado, la acción puntual de tormentas continuadas de gran intensidad puede también dar lugar a episodios de penetración de agua en la misma. Debido a ello, para completar la caracterización de la exposición a la lluvia batiente de la fachada, es también necesario considerar el volumen de lluvia que puede acumularse sobre ella en cortos intervalos de tiempo, antes de que la evaporación reduzca el humedecimiento adquirido por el cerramiento. A tal efecto, la norma considera de forma genérica que la evaporación en las fachadas se inicia tras 96 horas sin lluvia batiente sobre su superficie, momento en el cual se da por terminado cada periodo de humedecimiento.

Así, cada periodo de humedecimiento comprende el tiempo transcurrido entre dos períodos de al menos 96 horas carentes de lluvia batiente [5].

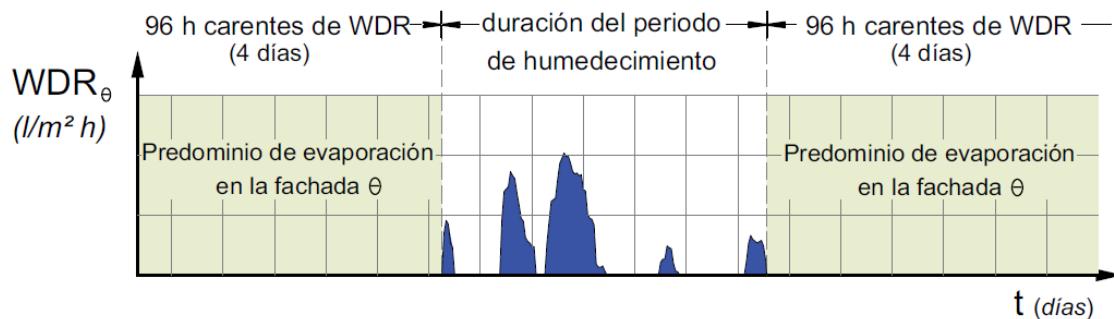


Figura 4.2. – Definición del periodo de humedecimiento sobre un cerramiento de orientación θ

Esta caracterización a corto plazo de la exposición se realiza mediante la ecuación de la lluvia batiente máxima de referencia. I'_S [l/m^2 periodo] se calcula considerando en el sumatorio, los registros horarios de precipitaciones acumuladas durante un periodo de humedecimiento, teniendo que realizar un cálculo diferenciado para cada uno de los períodos de humedecimiento que se producen a lo largo del periodo de tiempo analizado. De nuevo, solo se utilizan aquellos

registros en los que la dirección del viento D impulsa la lluvia batiente sobre la orientación de la fachada, por lo que es necesario realizar cálculos independientes para cada una de las posibles orientaciones de fachada evaluadas [12].

$$I'_S = \frac{2}{9} \cdot \sum v \cdot r^{\frac{8}{9}} \cdot \cos(D - \theta)$$

Es decir, la lluvia batiente máxima de referencia es equivalente a la lluvia batiente acumulada en cada periodo de humedecimiento.

4.2. Cálculo de la I'_S máxima asociada a un periodo de retorno

Recopilando la serie histórica de los valores máximos anuales de I'_S (considerado un mínimo de 10 años), el valor de referencia para la exposición a corto plazo I_S [l/m^2 periodo] se define como la lluvia batiente máxima acumulable en uno de estos intervalos de humedecimiento, para un periodo de retorno de 3 años. I_S representa el valor de la lluvia batiente máxima de referencia esperable en un periodo de retorno de tres años. Es decir, analizados los datos de años anteriores, se pretende “predecir” la máxima I'_S esperable en los próximos tres años.

A continuación se muestra el proceso de cálculo siguiendo la distribución estadística Gumbel [13-15] para obtener el valor de I_S . Dado el valor de una variable “ x ”, la fórmula que describe el periodo de retorno necesario para que se produzca ese escenario es la siguiente:

$$RP = \frac{1}{1 - e^{-e^{\frac{\mu-x}{\beta}}}}$$

Donde RP es el periodo de retorno esperado [años], x es la variable de estudio, en este caso I_S [l/m^2 periodo], μ la media de la distribución de valores máximos I'_S y β la dispersión de dicha distribución. Despejando la ecuación anterior se obtiene:

$$I_S = x = \mu - \beta \cdot \left(\ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{RP} \right) \right) \right)$$

Como se ha dicho anteriormente, el periodo de retorno para el que se deben realizar los cálculos es $RP = 3$ años. En nuestro caso los datos de partida fueron los valores máximos de I'_S entre los años 2007 y 2018. Los datos tendrán por lo tanto una antigüedad de 10 años y, al haber un dato por año, $N = 10$. Para resolver la ecuación anterior, se deben calcular previamente μ y β .

- Media de la distribución: $\mu = \bar{x} - \mu_y \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$

- Media de los máximos anuales de I'_S : $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$

Siendo x_i cada uno de los máximos anuales de I'_S y $N = 10$ al tener diez datos.

- Media de la variable reducida N : $\mu_y = \frac{\sum_{i=1}^N -\ln(\ln(\frac{N+1}{i}))}{N}$

- Desviación estándar de I'_S : $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N}}$

- Desviación estándar de la variable reducida N : $\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{N}}$

Siendo $y_i = -\ln(\ln(\frac{N+1}{i}))$, con i de 1 a N ; $\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N}$

- Dispersión de la distribución: $\beta = \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$

De este modo, a partir de los datos de I'_S máximos referentes a los últimos 10 años, se logra "predecir" la máxima I'_S esperable en los tres años siguientes. Como observación del procedimiento anterior, cabe destacar que las variables μ_y y σ_y sólo dependen del número de datos (años) disponibles N .

Debe tenerse en cuenta que el cálculo de la norma sólo resulta aplicable en aquellos emplazamientos en los que se hayan recopilado los registros horarios necesarios durante largos períodos de tiempo. Debido a la habitual carencia de esos registros, existen métodos alternativos de cálculo, así como simplificaciones del procedimiento anterior de validez contrastada, basadas en registros climáticos de menor precisión.

4.3. Extracción y depuración de datos

La descarga de los datos necesarios para la realización del trabajo se ha realizado desde las páginas web www.meteogalicia.gal y www.gobiernodecanarias.org. Dentro de las web se seleccionaron las estaciones a analizar, se escogieron los datos a descargar (precipitaciones, velocidad de viento y dirección de viento además de los datos básicos de la estación como altitud, latitud y longitud) y el periodo de estudio (2007-2018). Una vez seleccionados esos campos, se procedió a la descarga de todos los datos en formato Excel. De este modo, se obtuvieron tres hojas Excel para cada estación: una de precipitaciones, otra de velocidad de viento y otra de dirección de viento.

Las hojas Excel fueron depuradas a continuación ya que los datos obtenidos no podían ser analizados directamente. En el caso de Galicia, los datos tenían una periodicidad de registro diezminutal y en el caso de Canarias, treintaminutal (en ninguna web existía la posibilidad de descargar los datos horarios de manera directa). Por ello y debido a que la norma ISO se basa en datos horarios, los datos descargados se agruparon en períodos horarios. Para ello, se hizo la media cada seis datos en Galicia y cada dos datos en Canarias mediante fórmulas de Excel. En el caso de las direcciones del viento, la agrupación no fue tan sencilla ya que no se pueden promediar los grados directamente. Para realizar esa agrupación, se siguió la siguiente fórmula de carácter vectorial: $\text{Dirección horaria} = \tan^{-1}(\frac{\sum -\sin \theta}{\sum -\cos \theta})$

Todas aquellas horas en la que había algún dato vacío se consideraron como nulas y se dejaron los datos relativos en blanco. Además, en el caso de Canarias, faltaban algunas filas correspondientes a diferentes instantes treintaminutales. Por ello, se tuvieron que completar las series añadiendo todas esas filas y se les asignaron datos nulos.

En cuanto a las unidades, no se tuvo que realizar ninguna transformación debido a que los datos descargados ya estaban en I/m^2 en el caso de las precipitaciones, en m/s en el caso de la dirección del viento y en $^\circ$ para la dirección del viento.

El proceso anterior requirió de mucho tiempo debido a que el número de datos tratados era muy elevado. Se ha de tener en cuenta que cada hoja Excel estaba compuesta por 521.570 filas (en el caso de las estaciones gallegas) dado que había un registro cada 10 minutos durante las 24 horas del día durante 10 años. El tiempo de procesamiento del ordenador sumado a los diferentes pasos necesarios para la depuración total de los datos conllevó una importante dedicación de tiempo dentro de la elaboración de este trabajo.

Llegados a este punto ya se estaba en disposición de tratar los datos para realizar los cálculos explicados en los apartados anteriores.

4.4. Análisis de datos y creación de fichas resumen

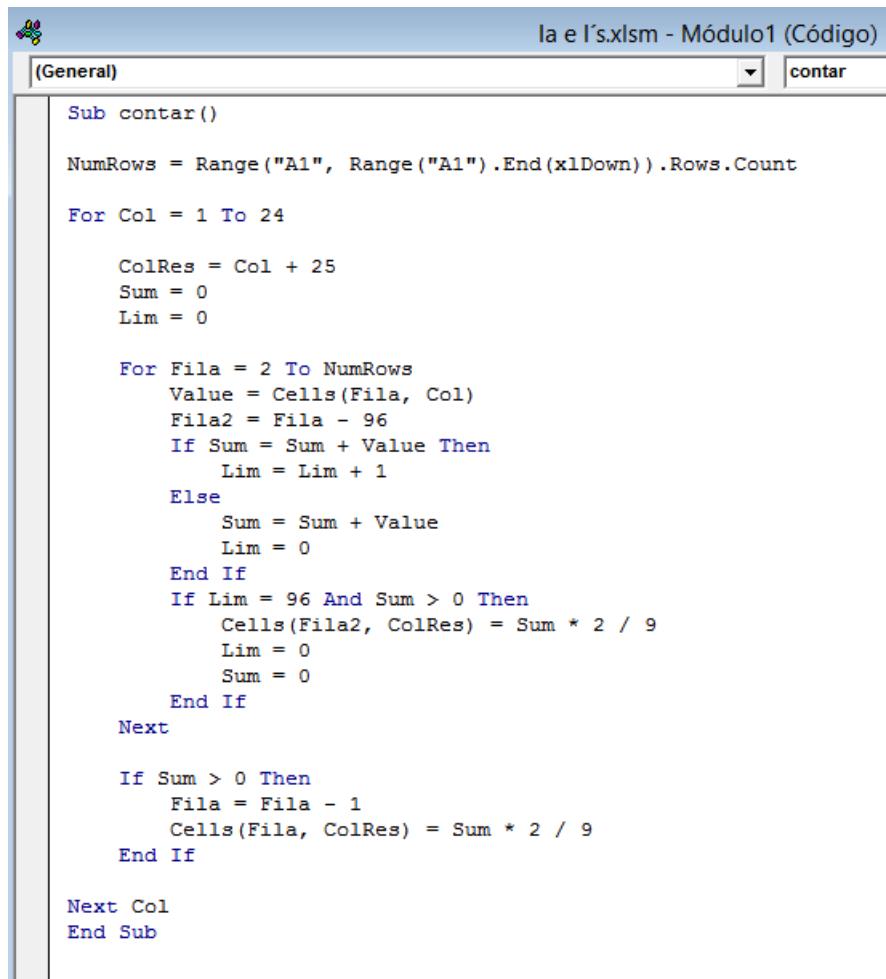
Una vez depurados los datos, el siguiente paso consistió en crear una plantilla Excel sobre la que copiarlos y obtener los resultados. Las primeras columnas de esa plantilla representaban un calendario horario de los 10 años estudiados. Teniendo en cuenta que entre 2007 y 2018 hubo tres años bisiestos, el número total de filas sobre las que copiar datos fueron: $(10 \text{ años} \cdot 365 \text{ días} \cdot 24 \text{ horas}) + (3 \text{ días} \cdot 24 \text{ horas}) = 87.672 \text{ filas}$.

Las tres columnas posteriores estaban compuestas por celdas en blanco donde había que pegar los datos depurados anteriormente para llenar en cada hora y en cada estación, las precipitaciones, velocidad y dirección de viento registradas. Por último, las columnas de la derecha estaban compuestas por la fórmula correspondiente a cada término individual del sumatorio de la ecuación de I_A . Esa fórmula se calculó considerando orientaciones de muro cada 15° , siendo $0^\circ/360^\circ$ el norte, 90° el este, 180° el sur y 270° el oeste. Debajo de las filas donde se realizaban esos cálculos, se incluyeron los cálculos de I_A para cada orientación de muro (en el que ya se incorporaba el sumatorio de cada término individual), la evolución anual de I_A y la evolución anual de las precipitaciones.

De manera paralela, se hizo otra plantilla en una hoja Excel aparte en la que se calculaban I'_S e I_S . En las primeras columnas de esa hoja, se debían copiar los valores individuales del sumatorio de I_A calculado en la plantilla anterior. Para calcular I'_S se tuvo que hacer una pequeña programación en una Macro de Excel donde se contemplaran los comienzos y finales de los períodos de humedecimiento.

Para escribir el código se utilizaron los conocimientos básicos de programación adquiridos durante los primeros cursos de carrera. A pesar de que la programación necesaria no era demasiado compleja, fue necesario realizar varios intentos fallidos hasta conseguir los

resultados esperados. La programación con la que finalmente se obtuvieron los resultados buscados es la que se muestra a continuación.



The screenshot shows the Microsoft Excel VBA editor with the following code:

```

Sub contar()
    NumRows = Range("A1", Range("A1").End(xlDown)).Rows.Count
    For Col = 1 To 24
        ColRes = Col + 25
        Sum = 0
        Lim = 0
        For Fila = 2 To NumRows
            Value = Cells(Fila, Col)
            Fila2 = Fila - 96
            If Sum = Sum + Value Then
                Lim = Lim + 1
            Else
                Sum = Sum + Value
                Lim = 0
            End If
            If Lim = 96 And Sum > 0 Then
                Cells(Fila2, ColRes) = Sum * 2 / 9
                Lim = 0
                Sum = 0
            End If
        Next
        If Sum > 0 Then
            Fila = Fila - 1
            Cells(Fila, ColRes) = Sum * 2 / 9
        End If
    Next Col
End Sub

```

Figura 4.3. – Programación en Macro para el cálculo de I'_S

En este código, lo que se programa es básicamente la definición de I'_S explicada anteriormente: haciendo un barrido de todas las filas y columnas, debe sumar el valor individual de todas las celdas que contienen lluvia batiente (valor superior a 0) desde el último periodo en el que se habían producido 96 horas sin lluvia batiente hasta que se produzca otro y multiplicarlo por el coeficiente $\frac{2}{9}$ como establece la norma. Es decir, la suma de los valores individuales de I_A en un periodo de humedecimiento multiplicado por $\frac{2}{9}$. Debajo de las filas anteriores se introdujeron las fórmulas correspondientes al cálculo de I_S para un periodo de retorno de 3 años, tal y como se explica en el apartado 4.2.

Por último, se creó una plantilla de la ficha modelo compuesta por dos páginas donde se expondrán los resultados de cada estación. En esa ficha se resume toda la información relevante explicada anteriormente ya que su objetivo principal es la extracción de conclusiones de una manera gráfica e intuitiva en cada estación estudiada. A continuación se muestra un ejemplo real del modelo de ficha:

GALICIA

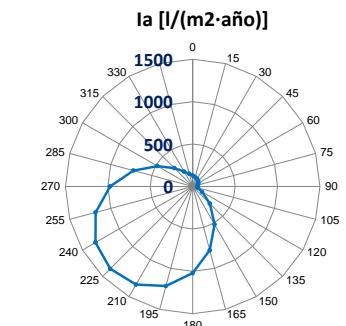
ESTACIÓN: ALTO DO RODICIO

DATOS ESTACIÓN

ALTITUD	981 m	TOTAL HORAS ANALIZADAS	87672
LATITUD	42,299 °	% DATOS VÁLIDOS	97,57%
LONGITUD	-7,591 °	HORAS CON LLUVIA	13472 15,4%

PLUVIOMETRÍA MEDIA ANUAL	1279,2 l/m ²
VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO	4,42 m/s
PRESIÓN EÓLICA MEDIA	11,72 Pa

DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL DE LA EXPOSICIÓN (FACHADAS MÁS EXPUESTAS)



ORIENTACIÓN DEL MÁXIMO 225 °

ORIENTACIÓN DEL MÍNIMO 90 °

MÁXIMO VALOR DIRECCIONAL 1374,1 [l/(m²·año)]

MÍNIMO VALOR DIRECCIONAL 53,72 [l/(m²·año)]



1/2

Figura 4.4. – Modelo de ficha resumen (página 1)

En la primera página se presentan datos relevantes de la estación, incluyendo el nombre de la misma y la comunidad autónoma a la que pertenece, además de la altura, latitud y longitud del emplazamiento. Al lado se pueden encontrar el número total de horas analizadas que en todos los casos es 87.672 (10 años) junto con el % de datos válidos y cuántas horas contenían precipitaciones. El % de datos válidos tiene en cuenta el porcentaje de los datos que eran nulos o erróneos del total de horas analizadas.

A continuación, se expresa la media de los valores de precipitaciones por año y la media de las velocidades del viento. La presión eólica media se calcula como $P_a = \frac{1,2 \cdot (\text{velocidad media}^2)}{2}$, considerando un coeficiente de presión genérico igual a 1.

En la parte inferior derecha de la ficha se puede observar un mapa donde se visualiza la provincia en la que se encuentra la estación. A su izquierda aparece la caracterización direccional representada en un mapa circular que muestra los valores de lluvia batiente I_A para las diferentes orientaciones de fachada del emplazamiento analizado. Se destaca, en último lugar, los máximos y mínimos valores de I_A direccionales, señalando las orientaciones de estas exposiciones.

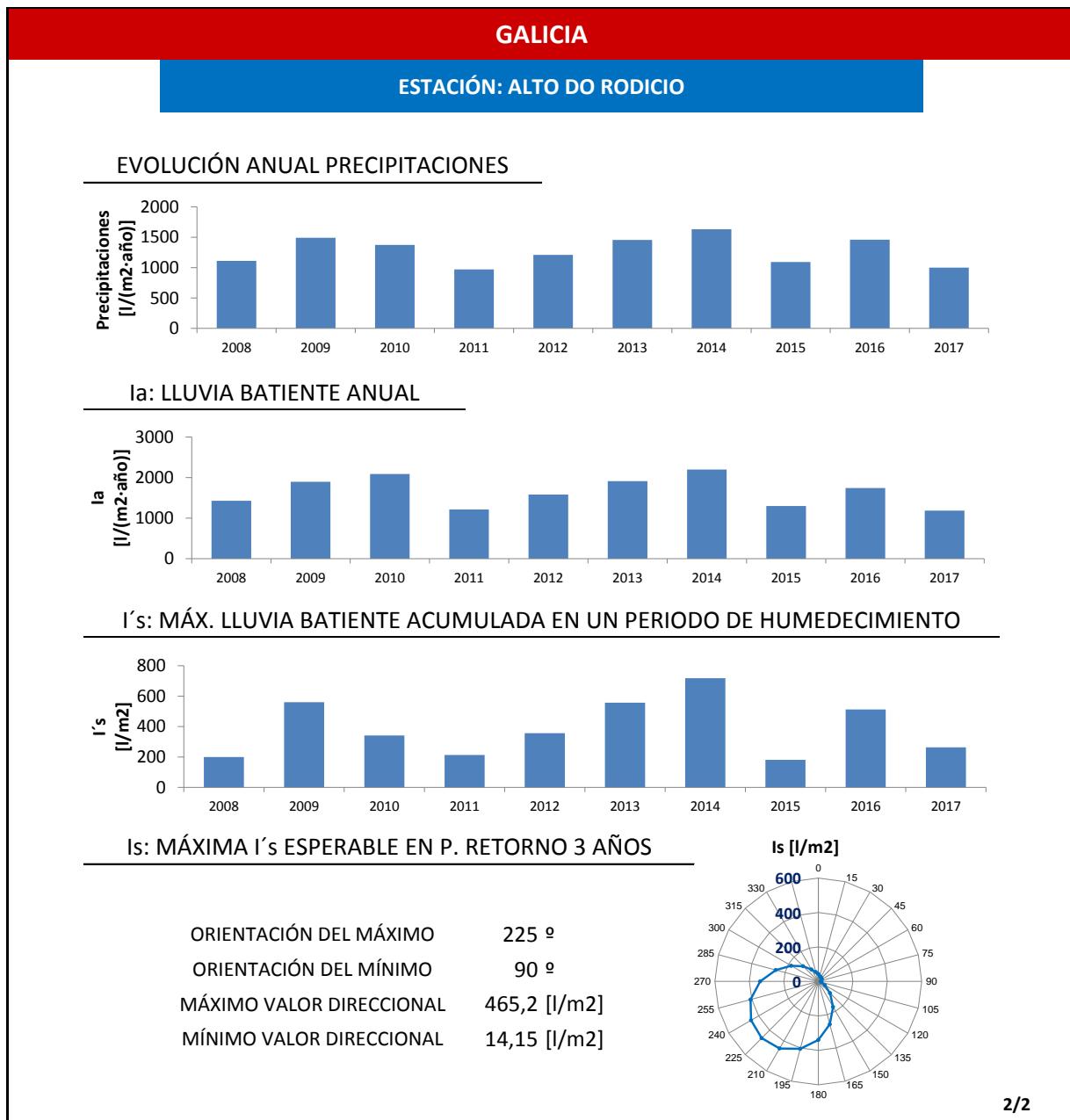


Figura 4.5. – Modelo de ficha resumen (página 2)

En la segunda página se distinguen cuatro apartados. El primero muestra la evolución anual de las precipitaciones mientras que el segundo expone la evolución anual de la lluvia batiente I_A a partir de los valores escalares, es decir, no tiene en cuenta la dirección del viento (soslayando el factor coseno de la fórmula correspondiente).

Los apartados tres y cuatro se alimentan de los cálculos realizados en la segunda plantilla. En el tercer apartado se indica la evolución anual del máximo valor de lluvia batiente acumulada en un periodo de humedecimiento I'_S . En este caso no se parte de valores escalares sino que se refleja el máximo de todos los valores direccionales de cada año. Por último, se representa un gráfico direccional que muestra los valores máximos esperables de lluvia batiente acumulada en un periodo de humedecimiento para un periodo de retorno de tres años I_S . Adicionalmente, se incluyen los valores máximos y mínimos de I_S direccionales, señalando las orientaciones de estas exposiciones.

Una vez creadas las plantillas, el siguiente paso consistió en completarlas con los datos de cada estación depurados previamente. Como se ha dicho anteriormente, en estas plantillas se incluían todas las fórmulas requeridas para obtener las fichas de resultados. La tarea realizada a continuación consistió en obtener las fichas resumen de cada estación, comprobando que todas generaban datos congruentes y se podían considerar válidas. En todos los casos las comprobaciones fueron satisfactorias, dando así veracidad a los datos descargados.

Por último, se procedió a analizar los resultados para crear los mapas climáticos y a extraer las conclusiones. Todos esos resultados se presentan de forma simplificada en el siguiente apartado y de manera completa en el anexo 9.2.

5. RESULTADOS

Las fichas de resultados obtenidas en el apartado anterior permitieron construir unas hojas resumen agregadas a continuación y ampliadas en el anexo 9.1., en las que se presentan los resultados obtenidos en todas las estaciones estudiadas, permitiendo así analizarlos y compararlos para extraer conclusiones.

El estudio de los registros climatológicos recopilados en las hojas resumen permite analizar los datos conjuntamente con el fin de obtener resultados definitivos que sustenten, o no, la propuesta planteada en este trabajo para determinar de forma correcta la estimación del riesgo de penetración de humedad en fachadas.

Por último, se han elaborado mapas de exposición para la comunidad autónoma de Galicia incorporando información relativa a las orientaciones de solicitud dominante. El análisis permitirá proporcionar una caracterización más exhaustiva de un fenómeno responsable de múltiples síndromes constructivos en los edificios que repercute de manera directa en mayores gastos de mantenimiento, menor rendimiento de la envolvente térmica y afecciones para la salud de los ocupantes del edificio. Con ello, se pretende contribuir a mejorar la estanqueidad actual de las fachadas, permitiendo ajustar sus requerimientos de diseño a las solicitudes reales existentes en cada emplazamiento y orientación.

Los resultados obtenidos se compararán en apartados posteriores tanto con otros índices más simples ya utilizados en España (Driving Rain Index) como con el grado de impermeabilidad que establece el CTE DB-HS1.

5.1. Hoja resumen simplificada

Siguiendo los pasos explicados anteriormente, a partir de las fichas modelo, se ha elaborado una hoja resumen de los resultados más importantes de las estaciones. En este apartado se muestra el resumen de los resultados obtenidos, ordenados de mayor a menor I_A para facilitar su análisis. Por no sobrecargar el documento, se muestra a continuación una imagen simplificada, pudiendo encontrar más información en el anexo 9.1.

ESTACIÓN	Latitud	Longitud	la escalar	Máx. la direccional	Máx. ls direccional
	[º]	[º]	[I/(m2·año)]	[I/(m2·año)]	[I/(m2·año)]
MURALLA	42,7456	-8,7763	4958,90	3994,45	1769,67
FORNELOS	42,3153	-8,4002	3860,48	3054,98	1343,89
CABEZA DE MANZANEDA	42,2602	-7,2983	2743,12	1985,14	898,74
SERRA DO FARO	42,5798	-7,9331	2634,11	1793,92	875,86
FONTECADA	42,9686	-8,8683	2508,10	1794,23	936,94
CASTRO VICALUDO	41,9945	-8,8662	2386,12	1647,89	696,78
MARCO DA CURRA	43,3431	-7,8944	2377,46	1588,41	801,95
FRAGAVELLA	43,4546	-7,4463	2160,59	1363,20	725,85
SÁLVORA	42,4649	-9,0136	2011,96	1410,62	537,54
ONS	42,3821	-8,9362	1880,04	1322,09	683,04
LARDEIRA	42,3752	-6,7835	1872,95	1290,11	598,43
CASTROVE	42,4593	-8,7043	1701,22	1342,57	536,13
MONTE ALOIA	42,0786	-8,6795	1683,48	1502,05	594,87
ANCARES	42,8208	-6,9229	1671,80	993,58	360,62
ALTO DO RODICIO	42,2987	-7,5907	1655,39	1374,09	465,25
MALPICA	43,3360	-8,8364	1653,02	1152,75	624,59
CORÓN	42,5801	-8,8047	1644,80	1156,91	365,55
PUNTA CANDEIRA	43,7043	-8,0525	1640,04	1108,77	473,97
CORRUBEDO	42,5552	-8,0286	1557,04	1154,18	551,53
XARES	42,2078	-6,8926	1526,13	934,49	321,50
BURELA	43,6449	-7,3748	1376,66	684,35	338,62
GUITIRIZ	43,2266	-7,7831	1364,22	1036,38	439,25
SANTIAGO EOAS	42,8760	-8,5594	1233,48	1029,67	556,12
VENTOSA	42,9560	-6,9153	1208,58	919,99	333,86
O INVERNADERO	42,1196	-7,3446	1111,04	634,60	265,83
O XIPRO	43,1771	-7,0479	1089,97	703,24	338,02
ILLAS CIES	42,2118	-8,9084	1022,78	874,80	522,55
CIS FERROL	43,4915	-8,2523	981,73	392,75	176,47
SANXENXO	42,4031	-8,7988	883,83	647,32	315,03
MELIDE	42,9074	42,9074	854,86	579,05	261,37
MOURISCADA	42,6144	-8,1373	843,84	504,98	334,91
GANDARELA	42,1736	-7,9682	772,87	544,45	220,58
PEDRO MURIAS	43,5407	-7,0830	768,62	477,69	243,01
MABEGONDO	43,2414	-8,2622	710,62	502,57	254,94
QUEIMADELOS	42,2253	-8,4285	686,60	586,78	248,99
VIANA DO BOLO	42,1630	-7,0896	682,03	549,85	194,27
LOURIZÁN	42,4092	-8,6642	591,52	328,15	168,97
MARROXO	42,4732	-7,5018	581,53	382,66	132,69
CAMPUS LUGO	42,9927	-7,5469	461,30	262,30	107,77
VERÍN-VILAMAIOR	41,9743	-7,3988	441,74	255,16	75,37
CANARIAS	Latitud	Longitud	la escalar	Máx. la direccional	Máx. ls direccional
	[º]	[º]	[I/(m2·año)]	[I/(m2·año)]	[I/(m2·año)]
TINAJO	29,0500	-13,6594	118,32	67,82	40,67
VEGA DE SAN MATEO	28,0192	-15,5328	106,63	62,59	32,71
HARÍA	29,1003	-13,4761	81,61	56,24	43,86
GUÍA DE ISORA	28,2283	-16,8336	47,35	27,57	19,19
SAN NICOLÁS DE TOLENTINO	27,9875	-15,7856	39,96	18,87	14,68
GÁLDAR	28,1558	-15,6652	37,01	21,67	10,88
PUERTO DE LA CRUZ	28,4106	-16,5344	18,64	11,57	6,13

Figura 5.1. – Tabla resumen de resultados

Aunque la tabla anterior parezca un océano de números, esta tabla ha sido necesaria para poder crear los mapas de exposición y extraer las conclusiones posteriores. A grandes rasgos, se puede observar la proporcionalidad existente entre los tres parámetros analizados pero no será hasta los apartados de correlaciones y conclusiones cuando se analicen estos resultados con detalle.

Lo que también se pone de manifiesto es el contraste de lluvia batiente entre las dos comunidades estudiadas. Tal y como se adelantaba en el alcance de este trabajo, las diferencias climáticas entre Galicia y Canarias son más que destacables. Se están comparando los dos climas extremos de España y ello queda patente en los resultados obtenidos.

Es destacable que el mayor valor de I_A registrado en Canarias es cuatro veces inferior al menor valor gallego. Por otro lado, el mínimo valor canario de I_A registra valores de lluvia batiente prácticamente despreciables. Los máximos registros gallegos de I_A presentan valores muy considerables, casi cincuenta veces superiores a los de los máximos canarios, lo que sin duda, debería traducirse en unas condiciones de diseño de fachada sensiblemente más exigentes.

5.2. Mapas de exposición climática

Para poder visualizar los resultados anteriores de una manera más gráfica, se han elaborado los mapas de exposición climática de los parámetros incluidos en la tabla anterior para las estaciones gallegas.

Debido a que el programa de diseño de los mapas sólo es capaz de gestionar las coordenadas en formato UTM (Universal Transverse Mercator), lo primero que se hizo fue transformar los datos de latitud y longitud de coordenadas geográficas (en grados sexagesimales) a coordenadas UTM. Para ello, se utilizó la "Calculadora Geodésica Utm<>Geo" de la página web enmaderal.jimdo.com.

Los mapas de exposición se han realizado con el software alemán de la compañía Nemetscheck llamado Módulo MDT (Modelo Digital de Terreno) de Allplan BIM 2016. Para ello se cargaron los valores de exposición en las coordenadas UTM de cada estación y se procedió a la triangulación de valores de exposición WDR, obteniendo así de curvas de nivel. El elipsoide de referencia para ejecutar el mapa ha sido el ED50 y no es el elipsoide "oficial" ETRS89. Esto se debe a que el oficial representa España de una forma muy "achatada" además de que existen muchos más mapas de fondo disponibles para el ED50 (el estándar de referencia hasta hace pocos años).

De este modo, se comenzó ubicando las estaciones meteorológicas mediante las coordenadas UTM y se les otorgó un valor I_A o I_S como variable en el eje Z. Posteriormente, se realizó un levantamiento topográfico del terreno y se obtuvieron las curvas de nivel, que en este corresponden con las curvas de exposición de la variable calculada.

Estos mapas de isolíneas permiten analizar de una manera más rápida y eficiente la exposición de las distintas zonas analizadas a la penetración de agua atmosférica.

El mapa presentado a continuación muestra los resultados de I_A escalar. Se debe recordar que los valores escalares no tienen en cuenta la dirección de viento, simplemente su velocidad y la cantidad de precipitaciones, por lo que no ofrecen una caracterización direccional de la exposición ante la lluvia batiente.

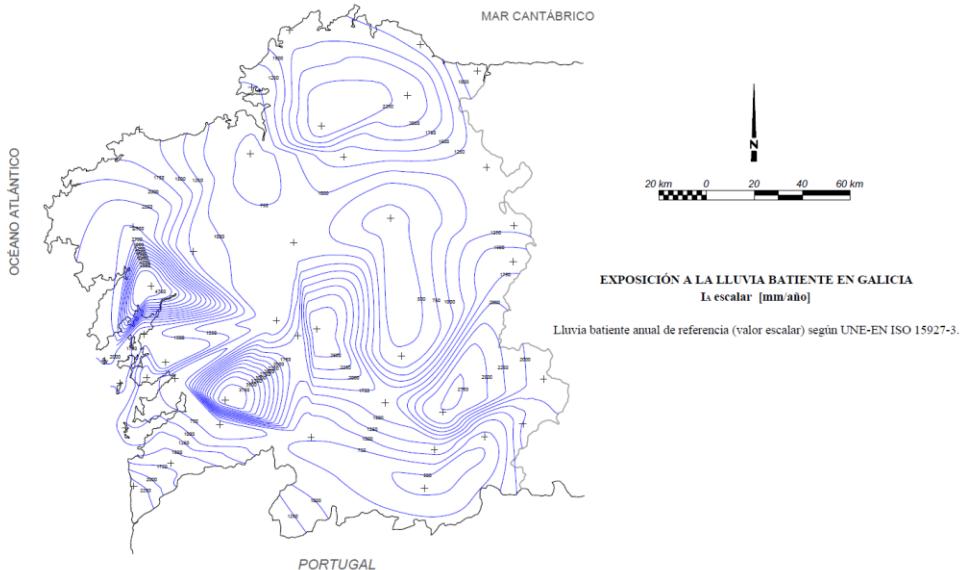


Figura 5.2. – Mapa de exposición I_A escalar

Para entender adecuadamente el mapa de exposición, se debe tener en cuenta que, cuanta mayor densidad de líneas, mayores valores de I_A . Del mapa anterior se deduce que las zonas más expuestas son principalmente las zonas costeras del sudoeste de la comunidad, esencialmente la provincia de Pontevedra. De la misma manera, las zonas más orientales de Orense y los territorios del norte de La Coruña y Lugo también presentan valores altos, siendo habitual que sea en las zonas montañosas donde se concentren las precipitaciones y el viento se manifieste con mayor fuerza.

A continuación se muestra un mapa de exposición daDRI de la comunidad de Galicia extraído de otro trabajo para estudiar la correlación entre los distintos resultados [16].

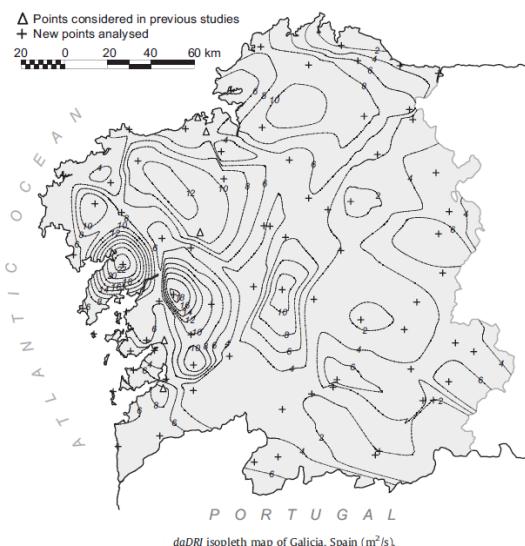


Figura 5.3. – Mapa de exposición daDRI

El índice daDRI se basa en datos diarios para obtener los valores de lluvia batiente. La ecuación que describe el Daily Driving Rain Index (daDRI) en m^2/s es la siguiente [17]:

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

El mapa de exposición daDRI anterior presenta grandes similitudes con el mapa de I_A . Aunque los valores numéricos no sean del mismo orden de magnitud, lo importante a la hora de valorar las zonas más expuestas es que la densidad de líneas sea similar en las distintas zonas, siendo así ambos valores proporcionales entre sí. Las zonas con mayor densidad de líneas son las mismas en los dos mapas, lo que indica una buena caracterización de la lluvia batiente mediante el índice daDRI y la posibilidad extrapolación de una variable a partir de la otra.

Por último, se van a incluir en este estudio, los mapas de exposición de dos variables más: máximo I_A direccional e I_S direccional.

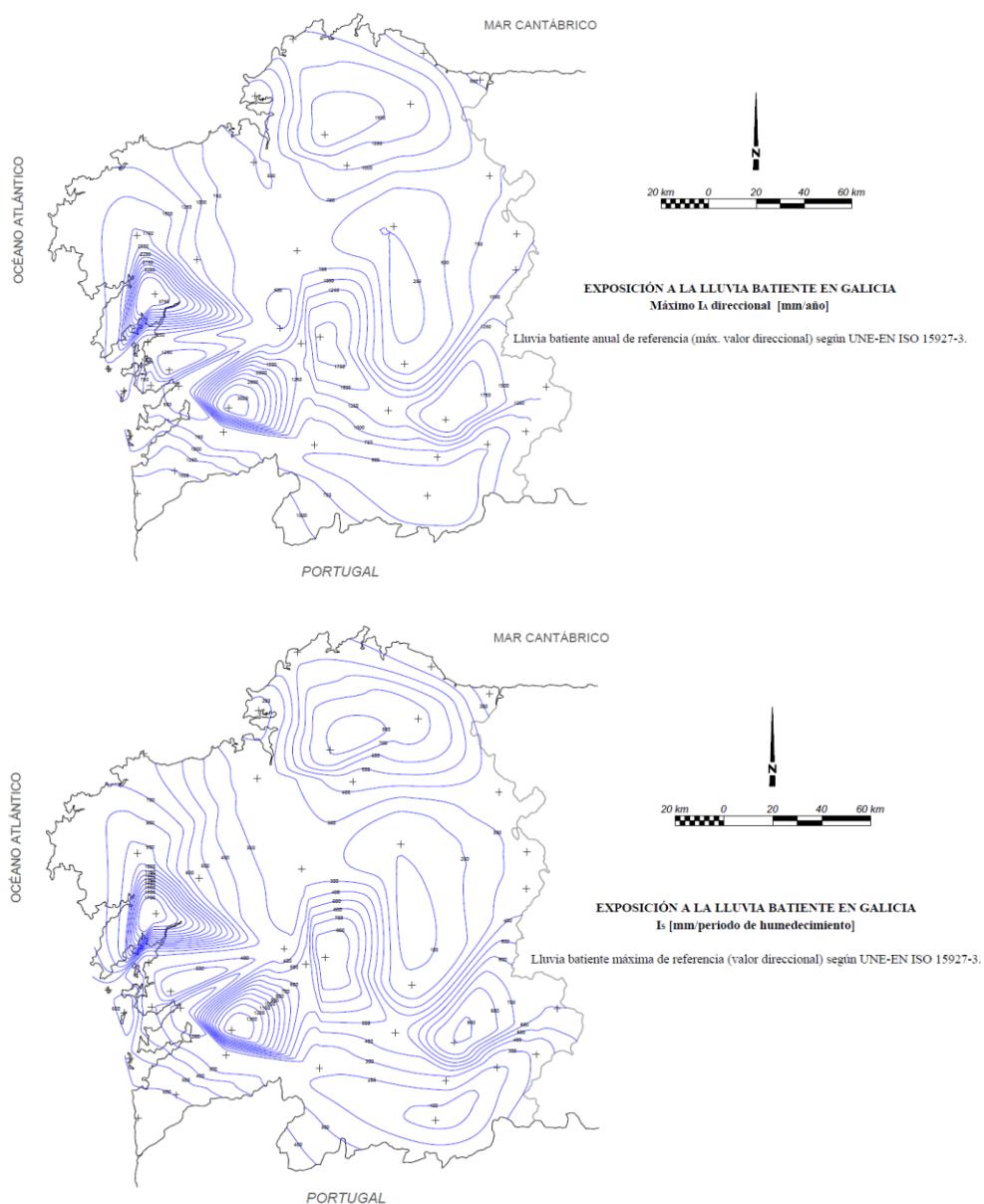


Figura 5.4. – Mapas de exposición I_A direccional e I_S

Siguiendo la intuición, lo esperable sería que no existiera ninguna relación entre las variables analizadas en los dos mapas anteriores ya que es habitual que en zonas secas se produzcan grandes tormentas de verano con elevadas descargas de agua y altas velocidades de viento. Sin embargo, se ha podido comprobar que sí que existe una elevada relación entre los valores direccionales de I_A e I_S ya que sus mapas de exposición muestran una densidad de líneas semejantes. Por ello, se puede concluir que en las zonas donde se producen importantes períodos de humedecimiento, son generalmente aquellas en las que llueve con frecuencia durante todo el año. Con estos resultados podemos afirmar que sería posible extrapolar los valores de I_S una vez conocidos los de I_A .

Ambos mapas son también muy parecidos al de I_A escalar, siendo coincidentes los territorios más expuestos en los dos mapas. Además, es digno de mención que, tras el análisis de todas las fichas de resultados, las orientaciones más expuestas según los mapas direccionales son las que se sitúan siempre hacia el oeste y el suroeste. Casi todas las estaciones han generado unos mapas direccionales con formas similares, estando prácticamente todos los valores máximos entre las orientaciones 195° y 255° tanto para el caso de I_A como el de I_S . Es por ello que las fachadas construidas hacia esas orientaciones deberán tener mayores protecciones frente a la penetración de agua atmosférica que las fachadas con orientación este.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este apartado se realiza un estudio comparativo de los resultados obtenidos. Para ello se utilizan correlaciones entre algunos parámetros analizados en este trabajo y otros obtenidos en proyectos anteriores.

Estas correlaciones se presentan en formato de gráficos X Y de dispersión. Cada punto representa una estación a la que se le ha asignado el valor de uno de los parámetros de estudio en el eje X y el valor de otro de los parámetros de estudio en el eje Y. Adicionalmente se ha agregado la línea de tendencia, la ecuación que la representa y su R^2 . Cuando R^2 es próximo a 1, se podrá afirmar que la relación de proporcionalidad entre sus puntos es muy elevada y, conociendo uno de los dos parámetros, se podría extrapolar el otro.

6.1. I_A escalar vs Máxima I_A direccional

Mediante esta correlación se va a determinar la influencia de la dirección del viento en la determinación de la lluvia batiente. Anteriormente se ha explicado que el valor escalar no tiene en cuenta el dato de dirección de viento, omitiendo la parte del coseno en la ecuación de I_A .

Esta correlación se ha obtenido previamente de una manera más gráfica a través de los mapas de exposición. Si se compara el mapa de exposición de I_A escalar con el de Máxima I_A direccional se deberían obtener los mismos resultados. En el caso de los mapas se ha comprobado que ambos eran muy similares, manteniéndose la proporcionalidad entre ellos. Si se ha realizado el cálculo de manera correcta, la proporcionalidad se debería mantener.

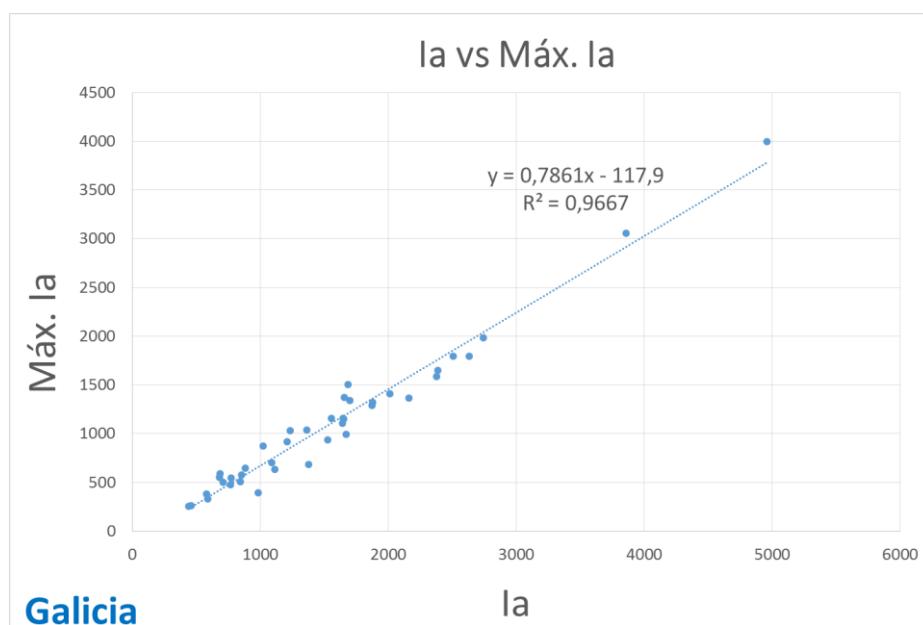


Figura 6.1. – I_A escalar vs Máxima I_A direccional en Galicia

Estos resultados corroboran lo que se anticipaba en el apartado anterior: mapas con distribución de isolíneas semejantes implican elevada proporcionalidad. Según la gráfica anterior, el valor de R^2 es muy próximo a 0,97, mostrando una tendencia muy marcada sin que haya puntos alejados de ella. Es decir, la relación de I_A escalar respecto del Máximo I_A direccional es prácticamente la misma para todas las estaciones. Multiplicando el valor de I_A escalar en una estación por un factor, podríamos obtener el valor de la Máxima I_A direccional y viceversa, siendo ese factor multiplicador el mismo para todas las estaciones.

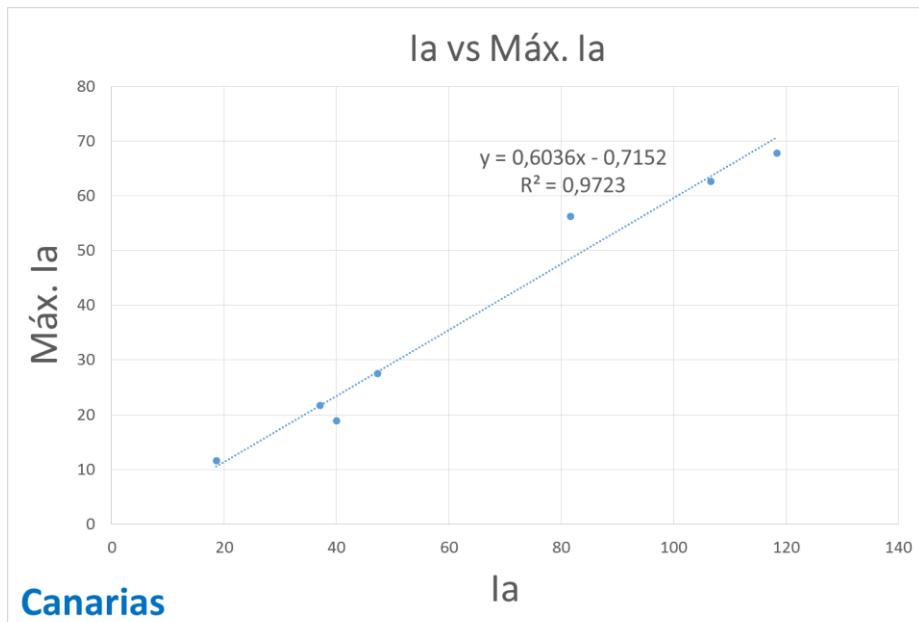


Figura 6.2. – I_A escalar vs Máxima I_A direccional en Canarias

En el caso de Canarias se puede comprobar que los resultados son similares, manteniéndose R^2 en el entorno de 0,97. Esta comprobación confirma las conclusiones expuestas en los párrafos anteriores, dando mayor credibilidad al análisis realizado.

Después de esta comprobación, se ha verificado la posibilidad de extrapolación del máximo direccional de I_A a partir de su valor escalar. Esto implicaría un gran ahorro de tiempo y esfuerzo a la hora de determinar la exposición de las fachadas debido a que no sería necesario realizar el laborioso cálculo direccional.

Sabiendo el máximo direccional con una simple extrapolación, se podrían construir todas las fachadas del edificio iguales, sin necesidad de conocer la exposición en las fachadas menos solicitadas. En ese caso, todas las orientaciones se deberían construir bajo los criterios de la más expuesta.

De acuerdo a la proporcionalidad mostrada, las posteriores correlaciones no será necesario calcularlas frente a las dos variables analizadas en este apartado ya que los resultados serán los mismos en el caso de comparar con I_A escalar con la Máxima I_A direccional. Con hacer la correlación con una de las dos variables será suficiente, asumiendo resultados equivalentes en los dos casos.

6.2. I_A escalar vs Pluviometría

En este apartado se quiere analizar la utilidad real de los estudios de lluvia batiente en los que se utilizan las tres variables principales: precipitaciones, velocidad y dirección del viento. En este caso se omiten las dos relacionadas con el viento y se comprueba si con el simple análisis de la cantidad de precipitaciones es suficiente para determinar la exposición de las fachadas a los fenómenos meteorológicos.

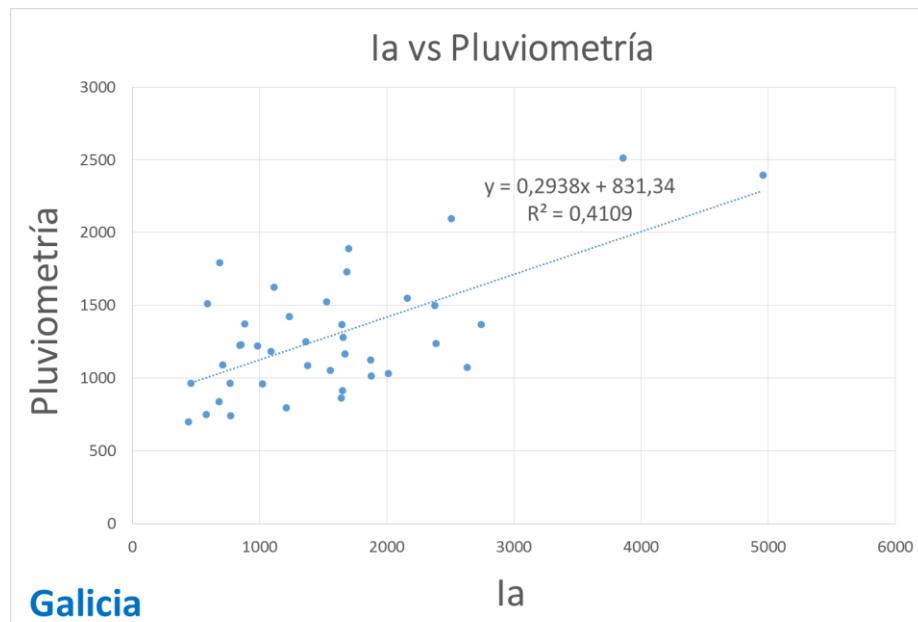


Figura 6.3. – I_A escalar vs Pluviometría en Galicia

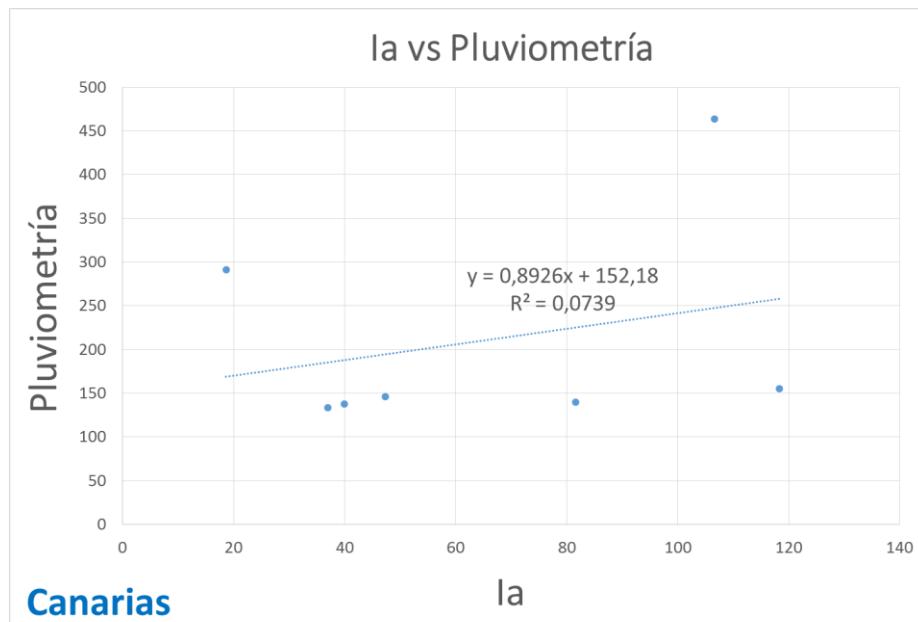


Figura 6.4. – I_A escalar vs Pluviometría en Canarias

Tanto en el caso de Galicia como el de Canarias se evidencia la escasa o nula proporcionalidad entre I_A y la pluviometría. La gran dispersión entre los puntos y el bajo valor de R^2 demuestran que no basta con analizar las precipitaciones para poder determinar el tipo de cerramientos necesarios en cada caso. En el caso de Galicia, R^2 es algo mayor pero no deja de ser un valor muy pequeño para mostrar algún tipo de proporcionalidad entre las variables. La escasa población de estaciones elegidas en Canarias ha podido ser un motivo causante de ciertas imprecisiones pero los resultados generales son coherentes si se comparan ambas comunidades.

Tal y como era previsible, el estudio exclusivo de las precipitaciones en un territorio no es reflejo del comportamiento de la lluvia batiente. Es imprescindible analizar el fenómeno combinado de la lluvia y el viento simultáneos, y no solo uno de los dos parámetros.

6.3. Máxima I_A direccional vs Máxima I_S direccional

En el apartado de metodología se han explicado las diferencias entre la lluvia batiente anual de referencia I_A e I_S . Como recordatorio cabe destacar que la diferencia principal entre ambos parámetros es que I_A simplemente indica el valor de la lluvia batiente acumulada por año mientras que I_S indica la cantidad de lluvia batiente acumulada en el periodo de humedecimiento más desfavorable esperable en un periodo de retorno de tres años, para cualquier orientación de fachada.

En este apartado se quiere comprobar si existe alguna relación entre ambas variables. La acción puntual de tormentas continuadas produce elevados valores de I_S pero si en ese año no se han producido precipitaciones en otros momentos, el valor de I_A debería ser pequeño.

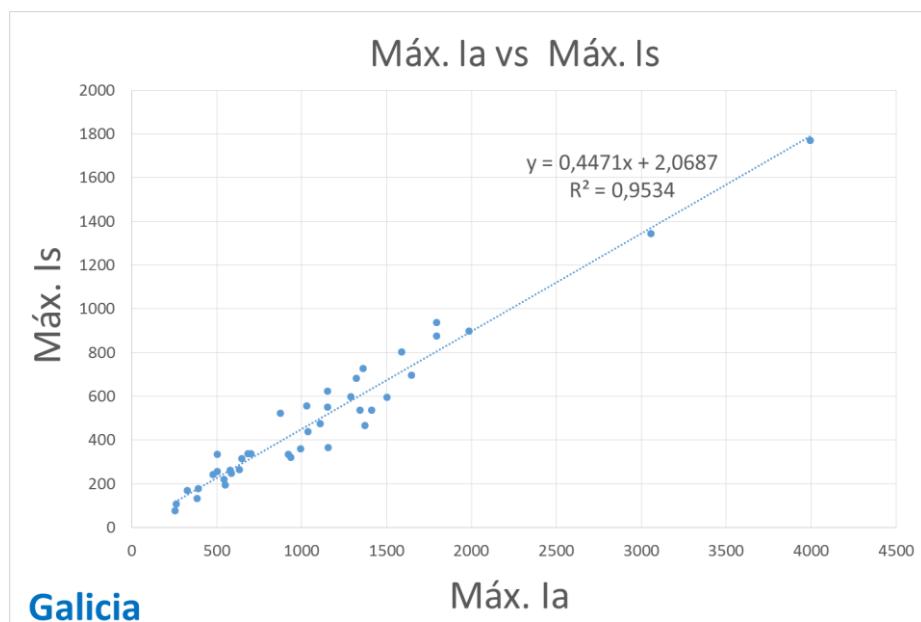


Figura 6.5. – Máxima I_A direccional vs Máxima I_S en Galicia

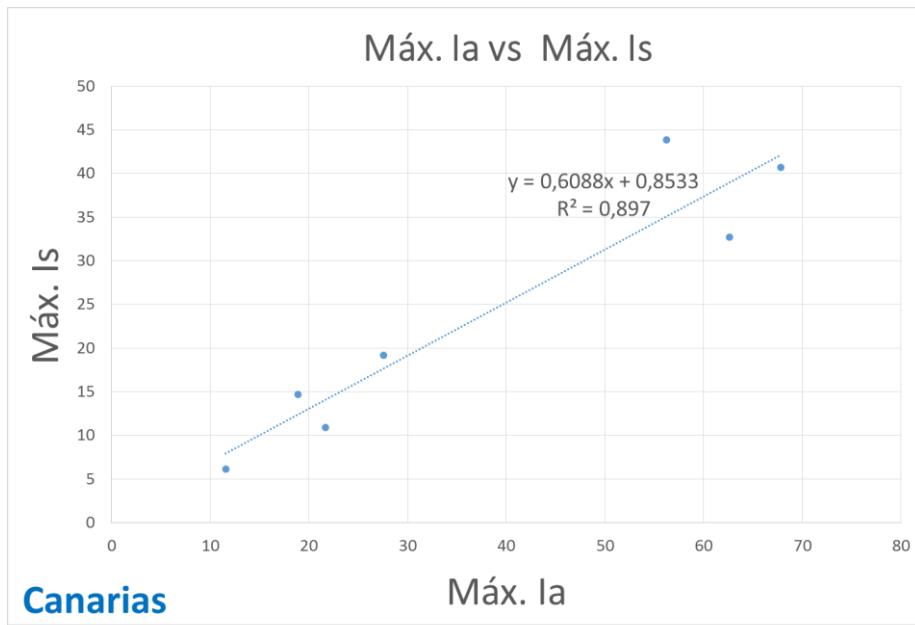


Figura 6.6. – Máxima I_A direccional vs Máxima I_S en Canarias

Tal y como se había adelantado con los mapas de exposición de ambas variables, la correlación existente entre ellas es bastante elevada. Con estos gráficos se ha podido comprobar que sí que existe una cierta proporcionalidad entre los valores direccionales de I_A e I_S , lo que implica una correlación fuerte a pesar de las diferentes condiciones climáticas en los territorios.

El valor de R^2 en Galicia se sitúa en torno a 0,95 mientras que en Canarias en torno a 0,9. Ambos valores denotan una elevada proporcionalidad, siendo más clara en el caso de Galicia. La diferencia entre ambas comunidades puede deberse a que los datos recopilados en Galicia eran diezminutales mientras que en Canarias eran treintaminutales.

Al existir proporcionalidad entre los resultados se evidencia que los lugares donde se producen períodos de humedecimiento significativos, son generalmente aquellos en los que llueve todo el año. Por ello, no sería necesario realizar el laborioso cálculo de I_S ya que se podría extrapolar su magnitud una vez conocido el valor de I_A .

Esta situación debe ser analizada en todos los territorios del ámbito nacional debido a que las variaciones pueden ser muy considerables entre las diferentes comunidades. Existen zonas muy secas en las que se producen, especialmente en verano, períodos de humedecimiento muy significativos.

Tal y como se ha dicho anteriormente, los resultados obtenidos en este apartado serían los mismos si se comparara con I_A direccional en vez de con I_A escalar ya que previamente se había demostrado la proporcionalidad entre los valores escalares y direccionales de I_A .

De la misma manera que ocurría en la situación citada en el párrafo anterior, al existir también en este caso una fuerte relación entre las variables, se podrá afirmar que las comparaciones que se hagan para I_A , arrojarán más o menos los mismos resultados que para I_S .

6.4. Grado de impermeabilidad vs I_A escalar

Mediante la siguiente correlación se quiere comprobar la fiabilidad de legislación española en lo que a la caracterización de la exposición de la lluvia batiente sobre fachadas se refiere.

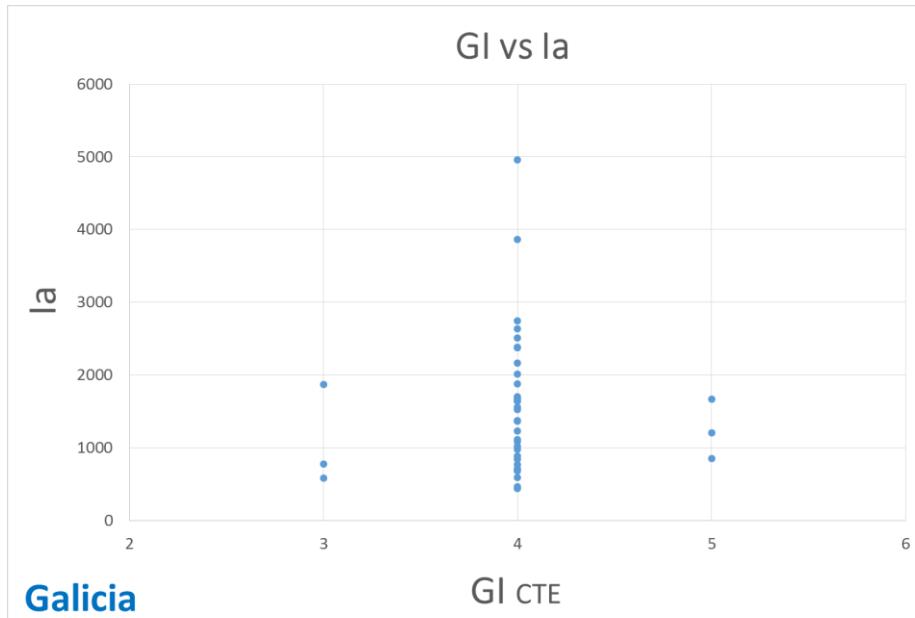


Figura 6.7. – Grado de impermeabilidad vs I_A escalar en Galicia

El cálculo del grado de impermeabilidad se ha realizado de acuerdo al procedimiento explicado en el apartado introductorio. Para ello, se ha supuesto una altura de edificio de 10 metros y terreno despejado y sin obstáculos, siendo la clase del entorno del edificio del tipo E0. Esas condiciones son equivalentes a las de las estaciones meteorológicas en las que se han recopilado los datos climáticos, asegurando una comparación rigurosa.

La comparación entre el índice I_A obtenido para cada estación y el grado de impermeabilidad asignado por el CTE pone de manifiesto la incoherencia de utilizar dichas asignaciones a la hora de asignar el grado de exposición a la lluvia batiente para un territorio. Analizando el gráfico anterior, se observan valores de I_A en la zona 3 más elevados que en la zona V, lo que denota una absoluta incongruencia.

En el caso de Canarias, cuyo gráfico se ha incorporado en el anexo 9.4. de este trabajo, se produce una situación similar ya que para la superficie de todas las estaciones analizadas, el CTE sólo asigna un grado de impermeabilidad diferente.

Para otorgar validez a las zonas pluviométricas diferenciadas en el CTE, el gráfico anterior no debería mostrar puntos situados a la misma altura para los distintos grados de impermeabilidad. Es decir, para el grado de impermeabilidad 3, I_A debería encontrarse en un rango de valores de 500 a 1000 [$\text{L/m}^2 \text{ año}$], para el grado de impermeabilidad 4, el rango de valores de I_A debería estar entre 1000 y 2000 [$\text{L/m}^2 \text{ año}$]; y para el grado 5, I_A debería ser mayor de 2000 [$\text{L/m}^2 \text{ año}$]. El gráfico ideal (adaptado) que representaría esa hipotética a situación sería el siguiente:

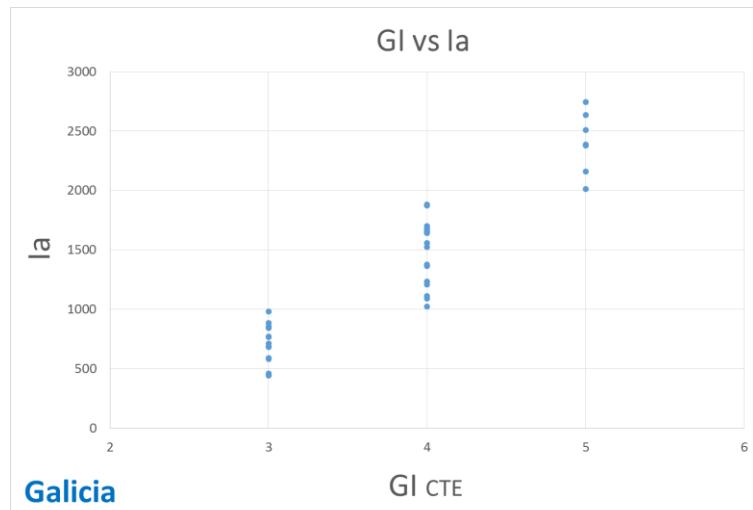


Figura 6.8. – Grados de impermeabilidad ideales en Galicia

6.5. I_A escalar vs aDRI

Después de haber de haber comprobado la ineficacia del CTE a la hora de establecer la exposición de los territorios españoles a la lluvia batiente, es necesario comprobar si otros índices de referencia simplificados son capaces de caracterizar la lluvia batiente con mayor acierto.

Los índices simplificados más utilizados, debido a su sencillez de cálculo, son los denominados aDRI: Driving Rain Index. Estos índices están basados en registros de datos horarios (haDRI), diarios (daDRI), mensuales (maDRI) y anuales (aaDRI).

En este trabajo se han calculado para algunas estaciones gallegas los dos índices simplificados más precisos con el fin de comprobar si con ese cálculo, se podrían obtener unos resultados válidos y equivalentes a los de I_A .

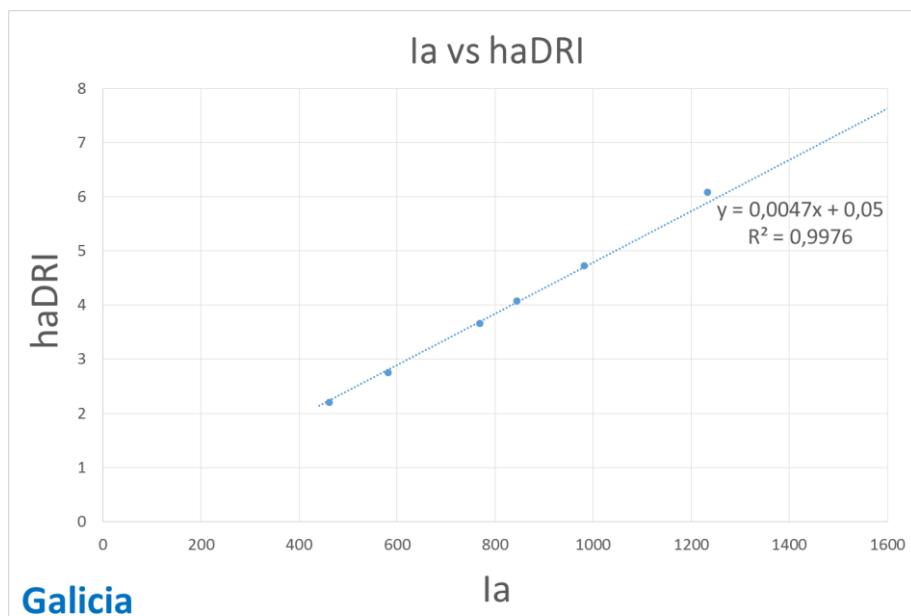


Figura 6.9. – I_A escalar vs haDRI en Galicia

Tal y como era esperable, el valor de R^2 es prácticamente 1 ya que los datos horarios eran los mismos en los dos casos y simplemente existen algunos cambios entre las fórmulas que representan a cada variable. La laboriosidad entre ambos métodos es prácticamente la misma ya que en los dos hay que manejar datos horarios, por lo que sería indiferente utilizar un índice o el otro.

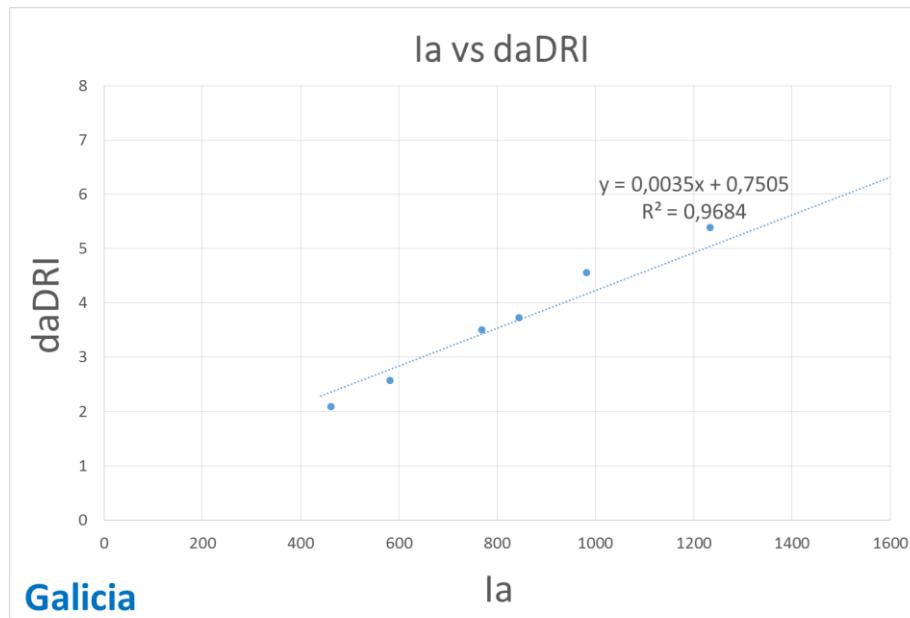


Figura 6.10. – I_A escalar vs daDRI en Galicia

Si se hace el análisis de las mismas estaciones partiendo de datos diarios, los resultados no mantienen tanta proporcionalidad pero sí que muestran unos resultados lo suficientemente buenos como para darlos por adecuados. Es decir, a partir del valor del daDRI se podría extrapolar el valor de I_A para cada estación sin necesidad de realizar cálculos tan laboriosos que conllevaran el manejo de dantos datos. En ese caso los datos a manejar se reducirían a una veinticuatroava parte al tratarse de datos diarios en vez de horarios.

Este resultado ya había aparecido previamente de manera gráfica cuando se han presentado los mapas de exposición. En ese caso, la distribución de isolíneas no era exactamente igual entre los dos mapas pero sí muy parecidas, corroborando esas pequeñas diferencias que se mostraban en el gráfico anterior.

Los dos índices simplificados de menor precisión (mensuales y anuales) no han sido calculados en este trabajo pero es esperable que la proporcionalidad se reduzca sustancialmente cuando se realicen sus cálculos. En el caso del índice mensual, se trabajaría con uno de cada 700 datos y en el caso del índice anual, con uno de cada 9.000. Esta reducción en la complejidad del cálculo se debería ver reflejada en la calidad del estudio.

A continuación se muestra un gráfico presente en la bibliografía internacional en el que se cuantificaron los errores que se cometían al utilizar las simplificaciones citadas anteriormente,

respecto a la utilización de datos climáticos diezminutales (de mayor precisión que los horarios requeridos por la norma y utilizados en este trabajo) [18].

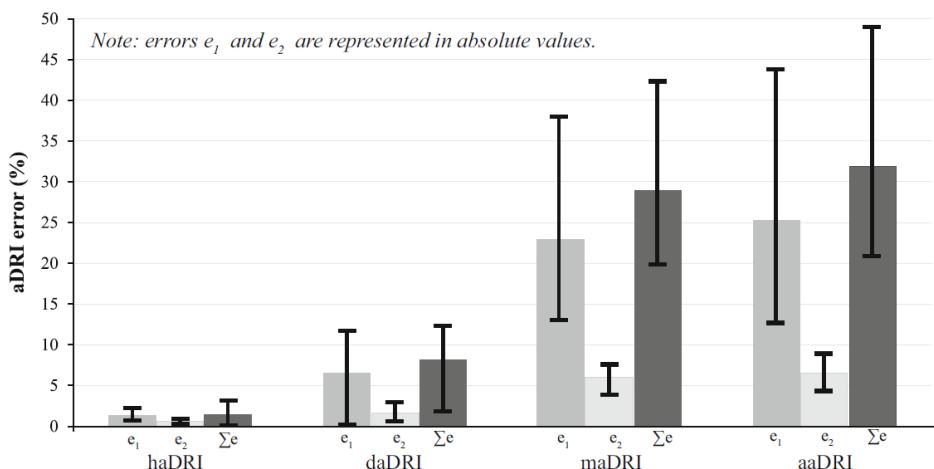


Figura 6.10. – Errores cometidos al utilizar índices simplificados

El gráfico confirma los resultados obtenidos para los dos índices simplificados más precisos. En el caso del haDRI, con el que se había obtenido un R^2 próximo a 1, el error es menor del 2 % mientras que en el caso de daDRI, con el que se había obtenido un R^2 mayor de 0,95, el error es menor del 10 %. Para los otros dos casos (índices mensuales y anuales) el error es mucho mayor, situándose en torno al 30 %.

De acuerdo a estos resultados, es válido el uso de índices simplificados que faciliten los cálculos y disminuyan la carga de trabajo pero será necesario trabajar con una periodicidad de registro de los datos al menos horaria y en ningún caso mensual o anual.

La comparación anterior se ha realizado con resultados daDRI obtenidos en las mismas estaciones y períodos que los I_A , consiguiendo una correlación muy alta. Por otro lado, se ha realizado la comparación con estaciones próximas y referidas a intervalos de tiempo diferentes (incluida en el anexo 9.5.) a partir de resultados de otros trabajos, obteniendo en ese caso correlaciones muy inferiores. Por ello queda patente la importancia, por un lado de establecer una caracterización lo más detallada posible del territorio y por otro, de contar con el mayor número de años de registros posible, llegando hasta 30 años tal y como recomienda la UNE (en este sentido no se puede hacer sino esperar ya que la mayoría de estaciones automáticas se fueron implantando en nuestro país entre los años 2000 y 2010).

7. CONCLUSIONES

Es sabido que existe una relación directa entre la definición de objetivos y la ejecución de tareas. Definir objetivos permite dirigir las acciones y los esfuerzos hacia lo que se quiere conseguir, empujando a las personas a ser constantes y persistentes. Aunque lo que se quiera conseguir parezca difícil, el hecho de visualizarlo, definirlo y planificarlo influye de forma determinante en el comportamiento de las personas y supone, en sí mismo, un fuerte estímulo que ayuda a su consecución.

Es por ello que el primer paso que se realizó en este trabajo fue el establecimiento de unos objetivos claros y bien definidos. Este hecho permitió que el Trabajo de Fin de Máster se fuera convirtiendo progresivamente de una obligación en un reto. A pesar de que el principio del trabajo resultó algo pesado debido a la repetitividad de las tareas, conforme fueron avanzando las semanas y los datos quedaron recopilados, se acrecentó la inquietud y el interés por conocer los resultados finales y por comprobar si las hipótesis e impresiones previas se corroboran o por el contrario eran erróneas. Eso no hubiera sido posible si no se hubiera definido al principio del trabajo qué se estaba buscando y cómo se quería obtener.

El objetivo principal de este trabajo era el cálculo y la caracterización de la lluvia batiente según la norma ISO 15927-3 en diferentes emplazamientos del territorio español para comparar posteriormente los resultados obtenidos con otras metodologías, como la planteada en el CTE o con aproximaciones internacionalmente aceptadas como el Driving Rain Index (aDRI). Tras la realización del trabajo, se puede afirmar que ambos objetivos se han cumplido satisfactoriamente y han permitido obtener unos resultados concluyentes.

De acuerdo a los resultados obtenidos, queda patente la necesidad 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 los cerramientos, habiendo tomado como referencia estándares internacionales ampliamente aceptados y ya contrastados. Al mismo tiempo es posible asegurar que no basta con analizar por separado las precipitaciones y el viento de un emplazamiento para realizar una caracterización de la lluvia batiente, es necesario considerar la simultaneidad de ambos parámetros en el estudio.

Por otro lado, se puede concluir que no sería necesario calcular los valores máximos direccionales ni los máximos asociados a un periodo de retorno ya que esos parámetros son más o menos extrapolables una vez conocido el valor escalar de la lluvia batiente anual de referencia I_A . Bien es cierto que la correlación referente a los periodos de retorno puede variar considerablemente en función de la ubicación que se esté analizando, pudiéndose considerar en algunos casos insuficiente como para poder extrapolarla. Ese estudio no será completo hasta que no se implanten estaciones automáticas que hayan registrado datos horarios durante al menos 10 años en todo el territorio, obteniendo así una mayor base muestral.

Tras realizar la comparación de los resultados obtenidos al utilizar la norma ISO 15927-3 respecto de los obtenidos con índices simplificados, se observa una fuerte correlación cuando se compara con el índice diario daDRI. Sin embargo, no ocurre lo mismo al comparar con los índices mensuales y anuales (maDRI y aaDRI).

Por ello, se puede afirmar que no es necesario realizar un estudio que tenga en cuenta datos horarios ya que con analizar los datos diarios se obtendrían resultados también muy realistas. Esta conclusión puede ser de gran ayuda ya que reduciría la complejidad y laboriosidad de estudios futuros. Además, el hecho de no utilizar datos horarios haría que casi todas las estaciones españolas estuvieran capacitadas en la actualidad para proporcionar los datos necesarios debido a que todas las estaciones vienen registrando datos diarios desde hace muchos años.

Con el fin de conseguir grados de impermeabilidad de mayor prestacionalidad en el CTE DB-HS1, los mapas de exposición obtenidos en este trabajo podrían sustituir a los actuales mapas zonales de pluviometría y viento utilizados por el CTE en los territorios analizados. Aunque no se haya estudiado en este trabajo todo el territorio nacional, las conclusiones generales obtenidas se pueden extrapolar a todo el territorio si se tiene en cuenta que los climas analizados son los más extremos de toda la extensión nacional.

El uso de los nuevos parámetros propuestos en el trabajo implica un reto para las instituciones implicadas en el desarrollo normativo de la construcción española (especialmente el Ministerio de Fomento y AEMET). Su colaboración es necesaria para minimizar los riesgos de penetración de humedad en los cerramientos verticales, optimizando la asignación de soluciones aceptables para los distintos grados de impermeabilidad requeridos.

También es necesario destacar la dificultad a la hora de entender la norma UNE-EN ISO 15927-3 transcrita de la norma internacional ISO 15927-3 ya que las carencias en su traducción invitan a cometer errores. Así mismo sería conveniente considerar una adaptación de la norma a las condiciones meteorológicas españolas que discriminaran la fórmula de cálculo en función del clima. Un ejemplo podría ser la modificación de la duración de un periodo de humedecimiento en España ya que en la actualidad, no resulta admisible considerar que la evaporación en la fachada se inicie tras 96 horas sin lluvia batiente tanto en Reino Unido como en España (dadas las enormes diferencias climáticas y de radiación solar entre ambos países).

En el ámbito personal, el trabajo realizado ha conseguido superar las expectativas iniciales, aportando una gran cantidad de conocimiento nuevo en una materia desconocida hasta el momento. Por último, no se debe ignorar la gran ayuda recibida por parte del tutor, mostrando siempre su mayor disposición en resolver todas las dudas y facilitando el avance del trabajo en los momentos de dificultad.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Broto C. Enciclopedia Broto de las patologías de la construcción. Links Barcelona, S.A. 2016.
- [2] Blocken B, Carmeliet J. A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92, 1079-1130. 2004.
- [3] Documento Básico Higiene y Salubridad HB 1-9 – HB1.11. Real Decreto 314/2006. Código Técnico de la Edificación. Boletín Oficial del Estado. 2006.
- [4] Pérez-Bella J.M, Domínguez-Hernández J, Rodríguez-Soria B, del Coz-Díaz J.J, Cano-Suñén E. 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. 2015.
- [5] Pérez-Bella J.M, Domínguez-Hernández J, Rodríguez-Soria B, del Coz-Díaz, J.J, Cano-Suñén E. 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. 2014.
- [6] Kottek M, Grisier J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* 15, 259-263. 2006.
- [7] Características de la precipitación en Galicia. Aemet Blog. 2017.
- [8] Características del clima canario. GEVIC. 2015.
- [9] Xunta de Galicia. Consellería de Medio ambiente, Territorio e Vivienda. Meteogalicia.gal
- [10] Gobierno de Canarias. Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca. Gobiernodecanarias.org
- [11] BSI - Code of practice for assessing exposure of walls to wind-driven rain. BS 8104. British Standards Institution. 1992.
- [12] AENOR. 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. Asociación Española de Normalización y Certificación. 2011.
- [13] Distribuciones estadísticas. Hidrología Usal. 2008.
- [14] Teoría de los valores extremos. Universidad de Granada. 2016.
- [15] Catalá F. Cálculo de Caudales en las redes de saneamiento. SPA: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Demarcación Centro. ISBN 84-600-7282-7. 1992.
- [16] Pérez-Bella J.M, Domínguez-Hernández J, Rodríguez-Soria B, del Coz-Díaz, J.J, Cano-Suñén E, Martín-Rodríguez A. Procedure for a detailed territorial assesment of wind-driven rain and driving-rain wind pressure and its implemtation to three Spanish regions *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 128: 76-89. 2014

[17] CEN. 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. European Committee for Standardization. 2009.

[18] Pérez-Bella J.M, Domínguez-Hernández J, Cano-Suñén E, del Coz-Díaz J.J, Alonso-Martínez M. On the significance of the climate-dataset time resolution in characterising wind-driven rain and simultaneous wind pressure, 32:1783-1797. 2017