Universidad Zaragoza

Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS DE INDICES DE EXPOSICIÓN A LA PENETRACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA EN FACHADAS DE ALEMANIA Y DINAMARCA.

ANALYSIS OF EXPOSURE INDICES RELATED TO RAINWATER PENETRATION ON GERMAN AND DANISH FAÇADES.

Autor

Jose Mª Tris Pueyo

Director

José Mª Pérez-Bella

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza

2023

0. RESUMEN

La protección frente a la penetración de humedad atmosférica en las fachadas de los edificios es un requisito básico para asegurar la habitabilidad y salubridad de las estancias interiores. La penetración de lluvia en los cerramientos reduce la durabilidad de los materiales de construcción (corrosión, deformaciones, ciclos de hielo-deshielo, eflorescencias, roturas, desprendimientos, etc.). Las necesidades de reparación subsiguientes se traducen en elevados costes económicos de mantenimiento. Para incorporar exigencias de diseño adecuadas para cada emplazamiento, previamente es necesario determinar el grado de exposición a la humedad que presentan las fachadas dependiendo de las condiciones climáticas características de cada lugar.

En este sentido, la lluvia batiente (wind-driven rain o WDR) -precipitaciones desviadas por el efecto del viento sobre la superficie vertical de la fachada-, representa la principal fuente de aporte de agua sobre las fachadas de los edificios. A su vez, la presión eólica simultánea a este aporte (driving rain wind pressure o DRWP) posibilita que el agua depositada sobre la fachada pueda penetrar a través de la estructura porosa de los materiales de construcción.

En este estudio, se analizará la exposición de las fachadas de diversas ciudades de Alemania y Dinamarca tanto a la lluvia batiente como a la presión eólica simultánea al aporte de lluvia batiente. Para ello, se ha analizado registros meteorológicos diarios simultáneos de precipitación (mm) y velocidad del viento (m/s), recopilados a lo largo de 10 años en cada una de las estaciones seleccionadas. La exposición a la lluvia batiente se determinará mediante expresiones semi-empíricas escalares, ampliamente utilizadas en el contexto internacional.

Los datos analizados han sido obtenidos a través de la base de datos de libre acceso *European Climate Assessment &* Dataset Project (ECA&D), la cual alberga observaciones diarias de estaciones meteorológicas en toda Europa (progresivamente se están incorporando datos de países de Oriente Medio y África del Norte). En total, se han analizado un total de 51 estaciones meteorológicas alemanas, situadas a alturas entre 250 y 1000 msm, situadas principalmente en la mitad sur del país. Estas estaciones se han complementado con el estudio de la única estación danesa con los registros climáticos simultáneos requeridos para el análisis.

Para cada una de las estaciones analizadas se ha elaborado una ficha resumen en la que además de identificar los índices de exposición ya mencionados, se analiza la evolución temporal de diversos factores meteorológicos, así como valores de precipitación y velocidad de viento asociados a diferentes periodos de retorno. Todos los resultados han sido recopilados en mapas de isolineas de exposición, permitiendo una rápida consulta gráfica de ambos indicadores de exposición. En este sentido, para mejorar la precisión de estos mapas en la zona norte de Alemania, se han integrado resultados de algunas estaciones costeras de Suecia y Noruega, identificadas previamente en otros trabajos Fin de Grado. Por último, se identifica la existencia de correlaciones entre diferentes indicadores y variables analizadas, determinando las regresiones más adecuadas que las relacionan.

Todos estos resultados han de contribuir a mejorar en el futuro el diseño de fachadas en edificios de ambos países analizados, ajustando sus prestaciones de estanquidad a las solicitaciones realmente presentes.

ÍNDICE

0. RESUMEN....2
1. INTRODUCCIÓN....4
2. OBJETIVO DEL ESTUDIO....8
3. ALCANCE....9
- FACTORES A TENER EN CUENTA EN LA RECOPILACIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS EN EL CASO DE ALEMANIA....9
- FACTORES A TENER EN CUENTA EN LA RECOPILACIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS EN EL CASO DE DINAMARCA. 12
- OTROS PAÍSES.....13
- PRECIPITACIONES DE LAS REGIONES ANALIZADAS. 13
- VELOCIDAD Y PRESIÓN BÁSICA DEL VIENTO. 15
- TOPOGRAFÍA DE AMBOS PAÍSES 16
4. METODOLOGÍA 18
- CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN DE LAS FACHADAS AL HUMEDECIMIENTO. 18
- CARACTERIZACIÓN DE LA PRESIÓN EÓLICA SIMULTÁNEA A LA LLUVIA BATIENTE 19
- CARACTERIZACION DEL ÍNDICE DE RIESGO DE PENETRACIÓN DEL AGUA. 21
5. RESULTADOS....22
- FICHAS RESUMEN DE LAS ESTACIONES ANALIZADAS.....22
- MAPAS DE EXPOSICIÓN (Alemania y Dinamarca). 26
- RISK INDEX OF WATER PENETRATION.....29
6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS....31
- DaDRI vs Pluviometría media. 31
- daDRI VS aaDRI.....32
- dDRWP vs aDRWP 32
- dDRWP vs Velocidad media del viento....33
- daDRI vs Altitud de cada estación. 34
- DRWP vs Altitud de cada estación....35
- Valores RIWP de todas las ubicaciones analizadas. 35
7. CONCLUSIONES....37
8. REFERENCIAS 39
9. TABLA DE FIGURAS. 41

ANEXO I. TABLA RESUMEN DE ESTACIONES ANALIZADAS.
ANEXO II. MAPAS DE EXPOSICIÓN ELABORADOS.
ANEXO III. FICHAS DE LAS ESTACIONES ESTUDIADAS.

1. INTRODUCCIÓN

El humedecimiento y la penetración del agua atmosférica en los cerramientos exteriores, puede llegar a provocar lesiones y deterioros en los edificios. La penetración de lluvia en los cerramientos reduce la durabilidad de los materiales de construcción (corrosión, deformaciones, ciclos de hielo-deshielo, eflorescencias, roturas, desprendimientos, etc.) [1] y disminuye la capacidad de aislamiento de los materiales, incrementando así los costes energéticos asociados al acondicionamiento térmico del edificio [2].

Aunque se trate de uno de los fenómenos más frecuentes, en realidad no es el más agresivo, ya que el deterioro por agua de lluvia es menor que, por ejemplo, el del agua de ascensión capilar [3].

Figura 1. Imágenes representativas del problema de la acción combinada de la lluvia y viento.

La absorción se produce cuando el agua penetra en el material por efecto de cierta presión positiva (presión eólica). El agua atraviesa el muro con más o menos velocidad en función de su permeabilidad, espesor y presión del agua. A su vez, la permeabilidad depende del tamaño de los poros y de su conectividad. Cuantos mayores son estos parámetros, mayor velocidad presenta el agua. Esto hace que las grietas, fisuras, etc. sean los puntos preferentes de penetración bajo presión (o incluso en ausencia de ella).

La capa de polvo que se deposita en la superficie de la fachada, combinada con los regueros producidos por el agua, puede llegar a generar manchas en las fachadas. Estas partículas de polvo, independientemente de su procedencia, se adhieren con más o menos intensidad al paramento de la fachada dependiendo, entre otros factores, del diseño arquitectónico que tenga el inmueble; cuanto más horizontal y rugoso sea el revestimiento, más adherencia se produce. El agua de lluvia asociada al viento influye de forma importante en el depósito de suciedad: las lluvias intensas facilitan la limpieza de las fachadas y las ligeras, por contra, favorecen el depósito de suciedades.

Por todo lo anterior, la protección frente a la penetración de humedad atmosférica en las fachadas de los edificios es un requisito básico para asegurar la habitabilidad y salubridad de las estancias interiores [4].

Este humedecimiento de los cerramientos verticales de edificación se debe fundamentalmente a la combinación simultánea de precipitaciones atmosféricas y del efecto del viento simultáneo [5-6]. Durante las precipitaciones, la acción del viento desvía la trayectoria vertical natural de las gotas de agua, acción que es responsable del aporte de agua líquida sobre la superficie vertical de las fachadas tal y como se representa en la siguiente imagen:

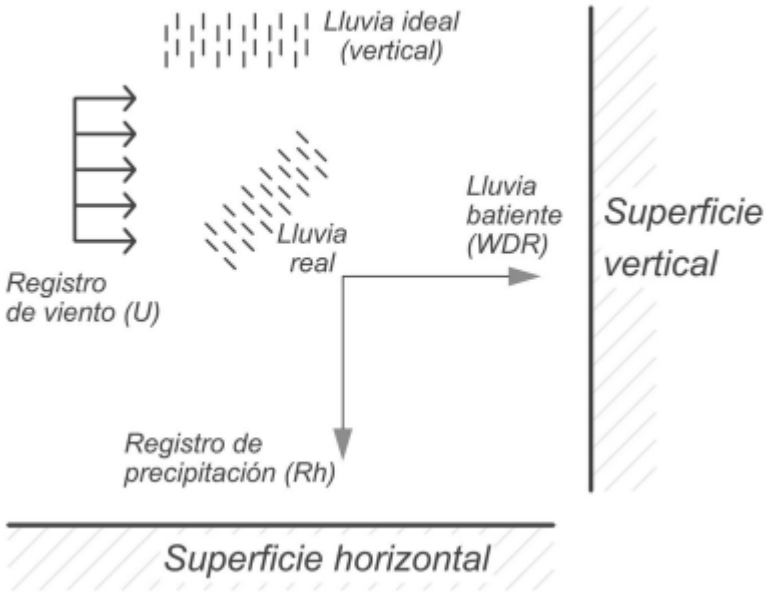


Figura 2. Fundamentos de la lluvia batiente.

La figura anterior refleja esta acción del viento combinada con las precipitaciones atmosféricas, también denominada lluvia batiente (wind driven rain o **WDR**) y los factores que interactúan para propiciar el humedecimiento de las fachadas.

Además, la presión eólica simultánea a la lluvia batiente sobre la fachada (driving rain wind pressure o **DRWP**) contribuye decisivamente a la penetración de este aporte de agua hacia el interior del cerramiento, incrementando el riesgo de presencia de humedad en el interior del edificio [7] y por lo tanto empeorando la habitabilidad y salubridad de las estancias interiores (aumento de la humedad relativa interior, desarrollo de condiciones propicias para el crecimiento de mohos, aparición de enfermedades respiratorias como alergias y asma, etc.).

Hay que considerar que la velocidad del viento y su acción sobre la superficie de un edificio están condicionadas por la altura de la fachada, la rugosidad del terreno circundante, y la geometría y configuración arquitectónica del paramento.

Históricamente, la lluvia batiente incidente sobre fachadas se ha caracterizado de forma experimental, mediante elementos de registros de agua situados en posición vertical, sin que nunca llegara a normalizarse un modelo estándar de estos aparatos. En la siguiente imagen, se observa el método general con el que se consigue registrar la lluvia batiente que incide sobre una superficie vertical:

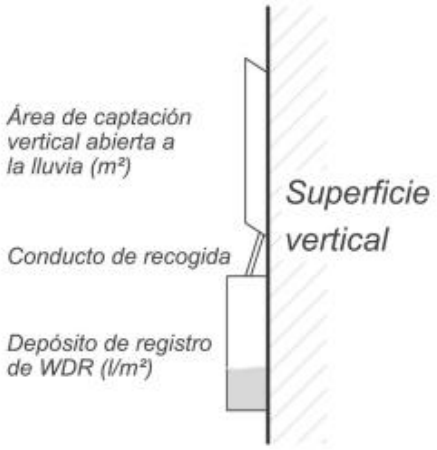


Figura 3. Esquema básico del instrumental necesario para registrar
la lluvia batiente sobre una superficie vertical.

El método utilizado es, mediante una pequeña zona de captación colocada verticalmente en la fachada de estos edificios abierta hacia la lluvia, se recogen estas precipitaciones combinadas con la acción del viento y se quedan almacenadas en un depósito de registro.

Cuantificando simultáneamente la lluvia batiente recogida en las fachadas y las condiciones ambientales que acompañan al evento de precipitación, es posible establecer una relación semi-empírica de proporcionalidad entre todas ellas (denominada *WDR relationship*).

$$WDR_{\theta} = k \cdot U \cdot R_h \cdot \cos\left(D - \theta\right) \tag{0}$$

Así, la lluvia batiente o cantidad de agua recibida por cualquier fachada depende de los siguientes factores (Figura 2):

- Registro de velocidad media del viento "U" (m/s)
- Registro de precipitaciones "R_h" (l/m^2)
- Dirección del viento "D" (º)
- Orientación de la fachada analizada "ϑ" (º)
- Coeficiente de ajuste empírico "K" (s/m)

Resulta evidente que una determinada orientación de fachada solo se humedecerá cuando la dirección del viento permita la desviación de las gotas de lluvia hacia su superficie. A su vez, ambos registros de velocidad de viento e intensidad de precisión varían en cada episodio climatológico que se produce (a mayor velocidad de viento e intensidad de precipitación simultánea, mayor será la cantidad de aguad desviada sobre la fachada).

Finalmente, el coeficiente de ajuste "K'' también varía dependiendo de las condiciones climáticas (su valor se ha relacionado con la velocidad terminal de caída de las gotas de agua, lo cual depende del diámetro de gota característico de cada episodio de precipitación, factor que también fluctúa a lo largo del propio evento de precipitación). Estamos por tanto ante un coeficiente de ajuste altamente variable y difícil de determinar con exactitud.

A lo largo de las últimas décadas, múltiples estudios han caracterizado la exposición de las fachadas a la lluvia batiente en múltiples lugares, partiendo de los datos disponibles en cada región. Así, el anterior cálculo puede realizarse a partir de registros meteorológicos simultáneos minutales, diezminutales, horarios, diarios, mensuales, anuales…

Si bien en los últimos tiempos estos estudios han optado por hacer uso de registros exhaustivos cada vez disponibles en un mayor número de estaciones meteorológicas automáticas (datos horarios), tradicionalmente los datos más utilizados han sido los mensuales y anuales, datos que por otra parte ofrecen una muy pobre caracterización de los fenómenos de lluvia y viento que se pretende caracterizar.

Del mismo modo, para soslayar la incertidumbre provocada por el factor empírico de ajuste, la mayoría de estudios han aceptado su omisión, evaluando así un índice de lluvia batiente (m^2/s) o driving rain index (DRI), habitualmente promediado para un periodo anual (aDRI). Si bien este indicador no determina con precisión los litros de agua por metro cuadrado recogidos en cada fachada, sí permite comparar de forma aproximada el nivel de exposición a la humedad atmosférica entre diferentes emplazamientos.

Finalmente, para soslayar la inexistencia de registros de dirección de viento en múltiples emplazamientos, muchos estudios optan también por soslayar el término coseno de la *WDR relationship*, obteniendo así una caracterización escalar de la exposición del emplazamiento, sin diferenciar entre diferentes orientaciones posibles de fachadas (ello permite también agilizar el cálculo, ya que no es necesario analizar de forma individual cada posible orientación).

2. OBJETIVO DEL ESTUDIO

Debido a los problemas que acarrea este fenómeno en las fachadas de los edificios, el objetivo principal de este estudio es el de analizar la exposición de las fachadas a la lluvia batiente (precipitación desviada por la acción del viento sobre superficies verticales) de diversas ciudades en Alemania y Dinamarca. Esta caracterización se complementará con el análisis de la exposición de estos emplazamientos a la presión eólica simultánea del viento (DRWP), obteniendo así una visión global de los dos parámetros más relevantes para la penetración de agua atmosférica en fachadas.

Para ello, se ha analizado registros meteorológicos diarios simultáneos de precipitación (mm) y velocidad del viento (m/s), recopilados a lo largo de un número de años suficientemente representativo (10 años) en cada una de las estaciones seleccionadas. La exposición a la lluvia batiente se determinará mediante expresiones semi-empíricas de carácter escalar, ampliamente utilizadas en el contexto internacional.

Para cada una de las estaciones analizadas se pretende proporcionar una ficha técnica en la que además de identificar los índices de exposición aDRI y DRWP, se analice la evolución temporal de estos indicadores y de los valores medios anuales de precipitación y velocidad de viento. Complementariamente, se estimarán los valores asociados a diferentes periodos de retorno para las variables meteorológicas de precipitación y velocidad de viento.

Para una consulta gráfica de estos resultados se elaborarán mapas de isolíneas (curvas de nivel de exposición) para caracterizar el territorio de ambos países analizados. Finalmente, se analizará la correlación existente entre diferentes indicadores de exposición, así como entre estos y las variables analizadas, lo que permitirá identificar extrapolaciones de interés para lograr una mayor precisión en los resultados o poder aplicar la metodología de cálculo incluso en emplazamientos con registros climáticos muy limitados.

Este análisis nos ayudará a determinar la exposición de las fachadas a la penetración de agua atmosférica, lo cual, es un paso previo indispensable para posteriormente definir soluciones constructivas suficientemente estancas. Esta caracterización de la exposición ha de posibilitar en el futuro establecer criterios de diseño más adecuados para las fachadas de los edificios, atendiendo a los materiales utilizados, detalles de construcción, sistemas de drenaje, protecciones adicionales, entre otros.

3. ALCANCE

En este estudio se analizará la exposición de las fachadas de diversas ciudades de Alemania y Dinamarca, tanto a la lluvia batiente como a la presión eólica simultánea al aporte de lluvia batiente.

Inicialmente, se marcó como objetivo poder analizar aproximadamente 100 estaciones en Alemania (habida cuenta del gran número estaciones de este país disponibles en la base de datos consultada) y el máximo posible en Dinamarca (ya que los datos disponibles eran menores que en Alemania).

Debido a una serie de factores que explicaremos a continuación, finalmente se han terminado analizado un total de 51 estaciones meteorológicas alemanas, situadas principalmente en la mitad sur del país. Estas estaciones se han complementado con el estudio de la única estación danesa con los registros climáticos simultáneos requeridos para el análisis.

Dichos registros, se han podido obtener de forma gratuita a través de la base de datos de libre acceso *European Climate Assessment &* Dataset Project (ECA&D).

El objetivo de ECA&D es combinar la recopilación de series diarias de observaciones en estaciones meteorológicas, el control de calidad, el análisis de extremos y la difusión tanto de los datos diarios como de los resultados de los análisis. La integración de estas actividades en un proyecto demuestra ser esencial para el éxito.

El conjunto de datos de ECA consiste en series de estaciones diarias obtenidas de las divisiones climatológicas de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales y series de estaciones mantenidas por observatorios y centros de investigación en toda Europa y el Mediterráneo.

Esta base de datos alberga observaciones diarias de estaciones meteorológicas en toda Europa (progresivamente se están incorporando datos de países de Oriente Medio y África del Norte).

- <u>FACTORES A TENER EN CUENTA EN LA RECOPILACIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS EN EL CASO DE ALEMANIA.</u>

- **Antigüedad de los datos:**

Para garantizar la representatividad de los resultados obtenidos, se marcó como objetivo disponer de al menos **10 años** de registros. En la siguiente imagen (Figura 4) se observa que los registros meteorológicos diarios recopilados en la base de datos van desde 1979 hasta 2022. La prioridad en este análisis era la de estudiar en detalle los registros de los años más próximos, por lo tanto se realizó desde 2012 hasta 2022.

- **Tipos de datos utilizados:**

A lo largo de las últimas décadas, múltiples estudios han caracterizado la exposición de las fachadas a la lluvia batiente en múltiples lugares, partiendo de los datos disponibles en cada región. Así, el anterior cálculo (1) puede realizarse a partir de registros meteorológicos simultáneos minutales, diezminutales, horarios, diarios, mensuales, anuales**…**

Si bien en los últimos tiempos estos estudios han optado por hacer uso de registros exhaustivos cada vez disponibles en un mayor número de estaciones meteorológicas automáticas (datos horarios), tradicionalmente los datos más utilizados han sido los **mensuales y anuales**, datos que por otra parte ofrecen una muy pobre caracterización de los fenómenos de lluvia y viento que se pretende caracterizar.

Del mismo modo, para soslayar la incertidumbre provocada por el factor empírico de ajuste (“K”), la mayoría de estudios han omitido este ajuste, evaluando así un índice de lluvia batiente (m^2/s) o driving

rain index (DRI), habitualmente promediado para un periodo anual (aDRI). Si bien este indicador no determina con precisión los litros de agua por metro cuadrado recogidos en cada fachada, sí permite comparar de forma aproximada el nivel de exposición a la humedad atmosférica entre diferentes emplazamientos.

Finalmente, para soslayar la inexistencia de registros de dirección de viento en múltiples emplazamientos, muchos estudios también han optado por soslayar el término **coseno** de la *WDR relationship (1)*, obteniendo así una caracterización **escalar** de la exposición del emplazamiento, sin diferenciar entre diferentes orientaciones posibles de fachadas (ello permite también agilizar el cálculo, ya que no es necesario analizar de forma individual cada posible orientación).

En nuestro caso, se ha analizado registros meteorológicos **diarios** simultáneos de precipitación (mm), velocidad del viento (m/s) **recopilados a lo largo de 10 años en cada una de las estaciones seleccionadas.**

Complementariamente, se han analizado también rachas de viento (m/s), una variable climática disponible en la base de datos y que, aunque no es indispensable para la determinación de las exposiciones a la penetración de agua atmosférica, si ha permitido su estimación asociada a diferentes periodos de retorno.

- **Gestión de la descarga de los datos:**

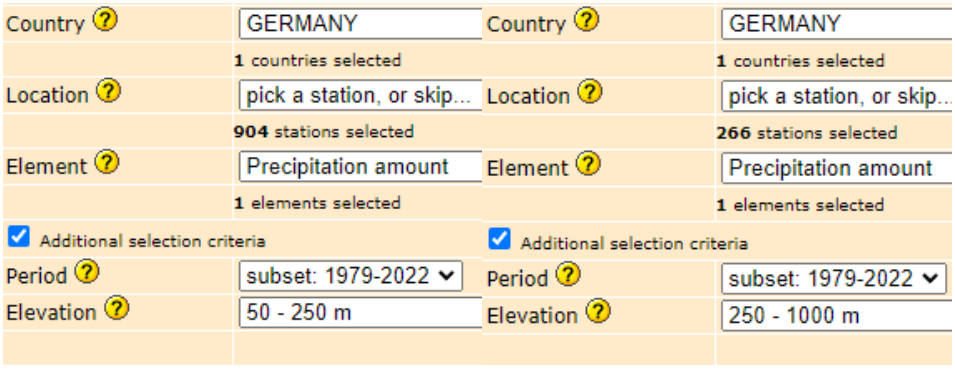
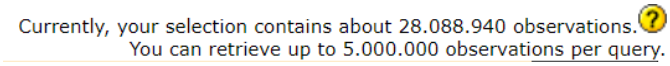


Figura 4. Imágenes representativas del número de estaciones en cada altura (Caso de cantidad de precipitaciones).

Alemania cuenta con un total de 4770 estaciones con datos de precipitación el periodo comprendido entre 1979 y 2022, aunque solo dispone de **155** estaciones con registros de velocidad de viento recopilados en el mismo periodo. Así pues, el número máximo de estaciones analizables quedó establecido en 155 estaciones, bajo la hipótesis de que todas las estaciones con datos de viento, disponen también de datos de precipitación.

A su vez, la descarga de los datos de precipitación de las 4770 estaciones no puede realizarse de forma directa, al exceder por mucho la capacidad de descarga establecida en la web de la base de datos:



Como alternativa para la descarga, la web permite filtrar las estaciones a descargar según su altitud, permitiendo de este modo seleccionar un número más reducido de estaciones. Como se observa en la anterior imagen, el número de estaciones a analizar entre 50-250 msm es casi cuatro veces mayor que entre 250-1000 msm.

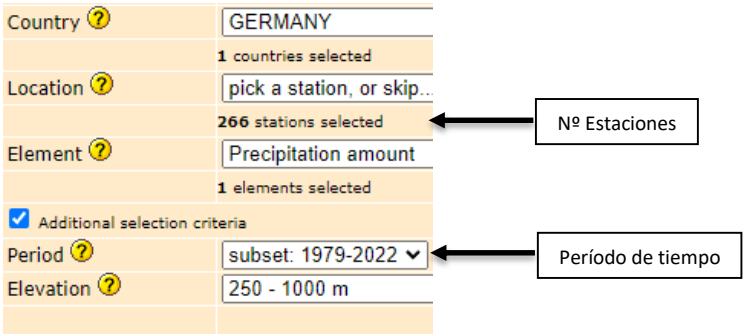
En total, 3595 estaciones se sitúan entre 0 y 50 msm, 904 se sitúan a una altitud ente 50 y 250 msm, 266 se encuentran entre 250 y 1000 msm y finalmente, 5 estaciones se ubican a más de 1000 msm de altitud.

Al respecto, debe aclararse que fue imposible descargar los archivos vinculados a estaciones comprendidas entre 0-50 msm y entre 50-250 msm, al bloquearse la web por el excesivo tamaño del archivo a descargar. A su vez, ninguna de las 5 estaciones situadas a más de 1000 msm disponían de registros de velocidad de viento. Como resultado, el estudio se ha restringido a aquellas estaciones situadas entre 250 y 1000 msm de altitud, que a su vez dispusieran de registros de velocidad de viento. Este número de estaciones (Figura 4) variará además según los factores explicados en el siguiente apartado.

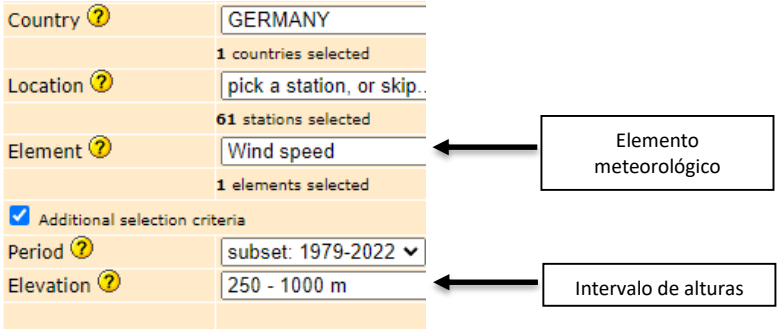
- **Cantidad de precipitaciones, velocidad de viento y rachas de viento:**

Posteriormente a la elección de las alturas de las estaciones, debemos fijarnos en que las estaciones que se analizan, tengan series de datos completas e ininterrumpidas, así como relativas a los 10 años objeto de estudio (en el intervalo 1979-2022, los datos podían verse interrumpidos antes de 2022). Gracias a un filtrado realizado en Excel se analizaron aquellas estaciones que cumplían el anterior criterio.

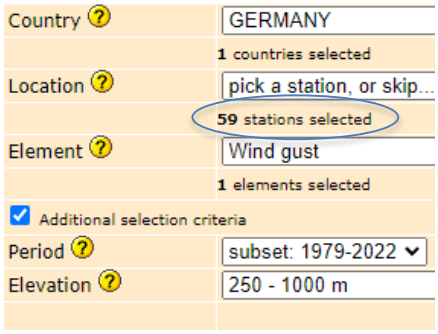
- **Cantidad de precipitaciones (mm/año)**



- **Velocidad del viento (m/s)**



- **Rachas de viento (m/s)**



Como resultado de este filtrado, la cantidad final de estaciones que pudieron ser objeto de análisis en este estudio se redujo a **51 estaciones**, todas ellas situadas entre 250 y 1000 msm de altitud. Como

resultado de esta selección, la mayor parte de las estaciones se refieren al sur de Alemania (a mayor altitud topográfica), quedan el norte del país caracterizado con una menor exhaustividad.

- FACTORES A TENER EN CUENTA EN LA RECOPILACIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS EN EL CASO DE DINAMARCA.

En el caso de Dinamarca, se ha realizado el mismo procedimiento que para Alemania, mismo tipo de filtrado de estaciones con mismas condiciones, ya sea altura, tipo de fenómenos meteorológicos (velocidad de viento, racha de viento y cantidad de precipitaciones.

Lamentablemente, para el caso de Dinamarca solo hemos podido contar con acceso a estos tres tipos de registros meteorológicos en una sola estación, la cual es la que está situada en Thyboroen, un pueblo pesquero localizado en Jutlandia, Dinamarca. Estos registros, han sido obtenidos de la misma web de donde se han obtenido los de Alemania.

Se puede observar en las siguientes imágenes, que estableciendo el mismo tipo de elemento, altitud, período de años (1979-2022), el número de estaciones es mucho menor:

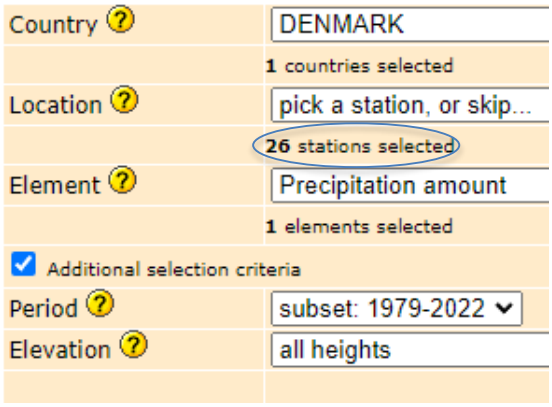


Figura 5. Imagen representativa del número de estaciones en todas alturas (Caso de cantidad de precipitaciones).

Añadiendo en el filtro, la opción de todas las alturas posibles, se observa que solo hay 26 estaciones en las que se pueden descargar registros de cantidad de precipitaciones (lo cual es uno de los registros que más estaciones suele disponer de ellos).

A su vez, si en vez de buscar estaciones con registros disponibles de cantidad de precipitaciones, se buscara con registros de velocidad de viento o rachas de viento, estos serían los resultados:

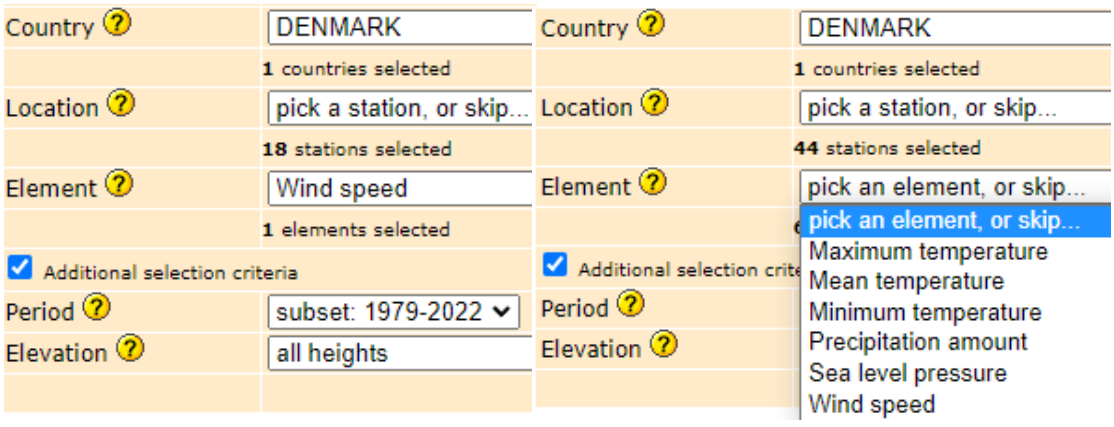


Figura 6. Imágenes representativas del número de estaciones en todas alturas.

Como se observa en la imagen, el número de estaciones con registros de velocidad del viento, se reduce a 18. Además, de que para registros de racha de viento, no hay ninguna estación con este tipo de registros meteorológicos.

Posteriormente a la búsqueda de información, se realizó el filtrado mediante Excel, de las 18 estaciones con registros diarios de velocidad de viento y las 26 con registros diarios de cantidad de precipitaciones.

Lamentablemente, para el caso de Dinamarca solo hemos podido contar con acceso a estos tres tipos de registros meteorológicos en una sola estación, la cual es la que está situada en Thyboroen, un pueblo pesquero localizado en Jutlandia, Dinamarca. Estos registros, han sido obtenidos de la misma web de datos donde se han obtenido los de Alemania.

- OTROS PAÍSES.

Con el objetivo de mejorar la caracterización de la exposición en el norte de Alemania y en el territorio de Dinamarca, al estudio fueron incorporados datos de exposición a la lluvia batiente y a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente recopilados en trabajos fin de grado previos, facilitados por el director del trabajo.

En total se incorporaron los datos de 5 estaciones en la costa sur de Suecia, así como de 3 estaciones adicionales en la costa sur de Noruega, permitiendo con ello matizar con una mayor resolución los mapas de exposición a elaborar en esa zona norte de Alemania-Dinamarca.

- PRECIPITACIONES DE LAS REGIONES ANALIZADAS.

En la siguiente imagen se presenta el climograma de Alemania en 2022 y se indica la precipitación anual (mensual) y la variación de temperaturas para una localización geográfica.

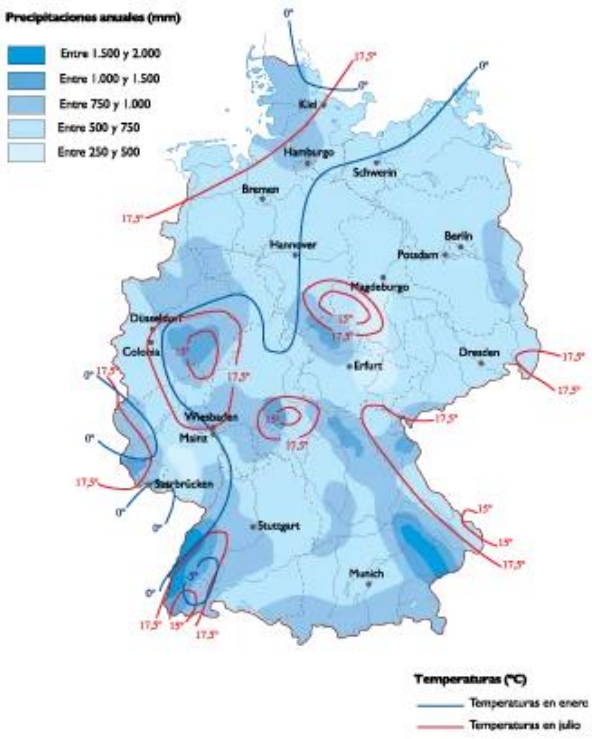


Figura 7. Climogramas de ciudades del país que muestran la precipitación anual (mensual) o la variación de temperaturas para una localización geográfica.

Como se puede apreciar (Figura 7), las precipitaciones en la zona del sur-este y sur-oeste son las zonas con mayor cantidad de precipitaciones mm/año que se pueden observar, suelen estar en un intervalo entre 500 y 2000 mm/año.

Sin embargo la zona centro-norte, salvo en una zona en el centro puntual y otra en el norte en Hamburgo (con 750-1500 mm/año), las precipitaciones suelen ser medias tirando a bajas, estarían entre 500 y 1000 mm/año.

Aparte de Alemania, también podremos observar el climograma de Dinamarca (Figura 8) en el cuál se representa lo mismo que en el de Alemania. Estos climogramas nos servirán de referencia para compararlos con los resultados dl estudio que se ha realizado.

Figura 8. Climogramas de ciudades del país que muestran la precipitación anual (mensual) o la variación de temperaturas para una localización geográfica.

En el caso de Dinamarca, como se puede observar, es más fácil analizar el climograma, ya que existen dos posibilidades de precipitaciones:

- Zona Oeste del país, con unas precipitaciones entre 750-1000 mm/año
- Resto del país, con unas precipitaciones entre 500 y 750 mm/año

- VELOCIDAD Y PRESIÓN BÁSICA DEL VIENTO.

Como se puede observar en la siguiente imagen, Alemania está divida en 4 zonas con distintas velocidades y presiones del viento.

- La zona centro está caracterizada por tener los niveles más bajos de velocidad y presión del viento variando entre 22,5-25 (m/2) y 0,32-0,39 (kN/m2)
- La zona del sur está más o menos igual de caracterizada que la zona del centro, una mezcla entre zona amarilla (22,5 m/s) y zona verde (25 m/s) (Figura 9)
- La zona norte es la que varía drásticamente, esto puede ser debido, a que es la zona que está en contacto con el Mar del Norte.

Figura 9. Mapa de velocidades y presiones básicas del viento en Alemania.

Algunas de las razones por las que se produzca ese drástico aumento tanto de velocidad básica del viento como de presión de este, pueden ser las siguientes:

- Gradiente de presión: El gradiente de presión es la diferencia de presión atmosférica entre dos puntos. En la costa, a menudo hay una diferencia de presión entre el océano y la tierra. Esta diferencia crea un gradiente de presión que impulsa el viento hacia la costa. Cuanto mayor sea la diferencia de presión, mayor será la velocidad del viento.

- Influencia de las corrientes marinas: Las corrientes marinas pueden afectar la velocidad y dirección del viento en la costa. Al moverse a lo largo de la costa, las corrientes pueden influir en el flujo de aire, acelerándolo o desviándolo. Esto puede resultar en vientos más intensos y turbulentos en la zona costera.

- Efecto de convergencia: En algunas áreas costeras, las condiciones meteorológicas pueden generar una convergencia de vientos provenientes de diferentes direcciones. Esta convergencia puede aumentar la velocidad del viento y la presión en la costa.

Y para el caso de Dinamarca:

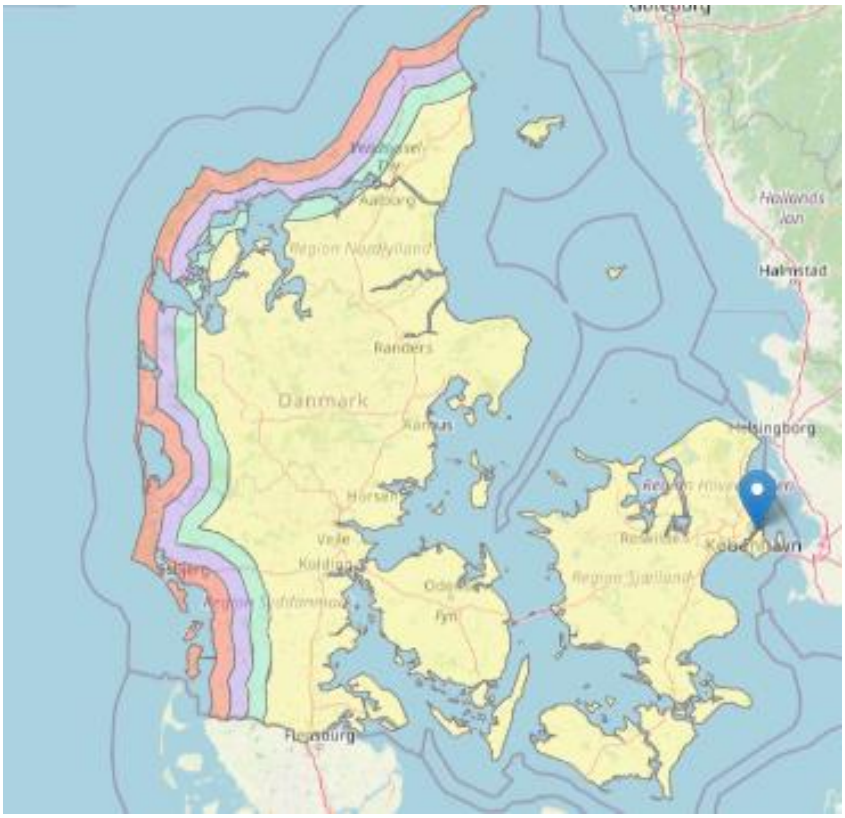


Figura 10. Mapa de velocidades y presiones básicas del viento en Dinamarca.

Como se puede observar, la velocidad básica del viento y su presión, van aumentando conforme se acerca a la zona del Oeste del país. La zona amarilla se caracteriza por tener una velocidad básica del viento de 22,5 m/s, la zona verde 25 m/s, la zona púrpura 26 m/s y la zona roja 27 m/s. Análisis mucho más sencillo que en el caso de Alemania.

- <u>TOPOGRAFÍA DE AMBOS PAÍSES</u>

En el norte de Alemania, se encuentran las llanuras costeras del Mar del Norte y el Mar Báltico. Estas regiones costeras consisten en terrenos bajos y planos, con playas de arena, dunas y marismas. Debido a esto se produce el aumento de velocidad y presión básica del viento.

Hacia el centro y el oeste de Alemania, se extienden las llanuras y colinas bajas. La región conocida como la Cuenca del Rin es una amplia llanura fluvial, que se caracteriza por sus extensos campos agrícolas y viñedos. Es por esto, que en los mapas climogramas, tanto las precipitaciones, como la velocidad básica del viento, obtienen los valores más bajos.

La parte sur de Alemania está dominada por el sistema montañoso de los Alpes. Aquí se encuentran las montañas más altas del país, como la montaña Zugspitze, que alcanza los 2.962 metros sobre el nivel del mar. Por tanto, se podría entender ese aumento de precipitaciones observado en el climograma de Alemania (Figura 7).

Figura 11. Mapa topográfico de Alemania.

La topografía de Dinamarca es principalmente llana, con una altitud promedio de alrededor de 31 metros sobre el nivel del mar. El país se encuentra en la península de Jutlandia y está compuesto principalmente por tierras bajas y colinas suaves.

Dinamarca está rodeada por el mar Báltico y el mar del Norte, lo que significa que tiene una extensa costa. Además, cuenta con numerosas islas, siendo la isla de Selandia (donde se encuentra la capital, Copenhague) la más grande y significativa.

No hay grandes cadenas montañosas en Dinamarca, y la altitud máxima se encuentra en el punto más alto del país, llamado Møllehøj, que tiene una elevación de solo 171 metros.

Figura 12. Mapa topográfico de Dinamarca.

4. METODOLOGÍA

Para determinar con fiabilidad la solicitación por humedad atmosférica sobre las fachadas de los edificios es necesario cuantificar tanto el aporte de agua atmosférica recibido por las mismas (responsable del humedecimiento del cerramiento), como la presión eólica simultánea a la precipitación (responsable de su penetración al interior del mismo) [7]. Para ello en la actualidad se dispone en el ámbito internacional de diferentes procedimientos de cálculo, que permiten determinar con precisión ambos parámetros de interés. m^2

- CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN DE LAS FACHADAS AL HUMEDECIMIENTO.

Para caracterizar la exposición del cerramiento vertical al humedecimiento, desde los años 50 y 60 del siglo pasado, diversos investigadores europeos abordaron durante los eventos de precipitación la medición simultánea de la intensidad de lluvia, de la velocidad del viento y de la lluvia batiente recibida por las superficies verticales [8-9].

El resultado de estos trabajos de campo permitió establecer una ecuación semi-empírica (conocida como relación WDR o WDR-relationship (1), capaz de estimar el valor de lluvia batiente que reciben las fachadas de cualquier emplazamiento, únicamente a partir del registro simultáneo de ambos datos meteorológicos (Figura 2 y 3).

$$WDR = k \cdot U \cdot R_h \quad (1)$$

- Registro de velocidad media del viento "U" (m/s)
- Registro de precipitaciones "R_h" (l/m^2)
- Coeficiente de ajuste empírico "K" (s/m)

La relación (1) asume un flujo estacionario y horizontal para el viento, perpendicular a la superficie del cerramiento de fachada y constituye la base de todo el desarrollo posterior en este estudio, ya que posibilita estimar la exposición al humedecimiento de cualquier fachada únicamente a partir de los datos climáticos de viento y lluvia registrados en el emplazamiento.

Por su parte, el valor del coeficiente de ajuste k depende del tamaño de la gota de agua característico de cada episodio de precipitación, siendo mayor cuanto mayor es la intensidad de estos episodios. Diferentes estudios de campo han propuesto valores medios para dicho coeficiente que habitualmente oscilan entre 0,20 y 0,25 s/m [8,13-15], pero este ajuste puede llegar incluso a oscilar entre 0,1 y 0,5 en situaciones de precipitación concretas.

Obviandodo el factor de ajuste k, la precisión de la estimación de WDR depende de la exhaustividad de los datos meteorológicos empleados, así como de continuidad y antigüedad (representatividad). Para una mayor precisión, el viento U y la precipitación Rh han de ser registrados simultáneamente en intervalos de tiempo de la menor duración posible, minimizando así los posibles errores debidos al promedio de los registros en intervalos de mayor duración y a la menor precisión al caracterizar la simultaneidad de ambos datos meteorológicos [11-12]. De manera análoga, se recomienda disponer de registros climáticos con una antigüedad al menos igual o superior a 10 años.

La aplicación más sencilla de esta relación WDR se alcanza omitiendo el coeficiente empírico de ajuste k y la caracterización direccional. Se obtiene así un índice de lluvia batiente (m^2/s) o *driving rain index* (DRI), habitualmente promediado para un periodo anual (aDRI), que permite comparar de forma aproximada el nivel de exposición a la humedad atmosférica entre diferentes emplazamientos.

Para su cálculo, es frecuente utilizar valores promedio anuales de precipitación R_h (mm/año) y velocidad de viento *U* (m/s) registrados a lo largo de N años en cada emplazamiento, como muestra la ecuación (2) [16].

$$aDRI = \frac{\sum_{i=1}^{N} U \cdot (\frac{R_h}{1000})}{N} \quad (2)$$

- Registro de velocidad media anual del viento "*U*" (m/s)
- Registro de precipitaciones "R_h" (l/m^2)
- Número de años "*N*" en los que se han registrado los datos

El uso de registros meteorológicos referidos a intervalos menores al anual (como el diario o mensual), permite obtener mayor precisión en la caracterización de la exposición, al reducir el error de promedio cometido y desechar la velocidad de viento de aquellos intervalos (diarios o mensuales) en los que no se produce precipitación alguna. En dichos casos, el índice se denomina daDRI o maDRI respectivamente, mientras que en caso de utilizarse datos medios anuales, el indicador de denomina aaDRI.

Para calcular el indicador daDRI, el primer paso a realizar sería calcular el índice de lluvia batiente de cada día durante "*N*" años y posteriormente, se realizaría el sumatorio de los 3650 valores daDRI disponibles (añádanse los días adicionales correspondientes a años bisiestos) para dividirlos entre los "N" años que se realiza el estudio.

A pesar de no cuantificar el volumen real de agua recibida sobre las fachadas, por su simplicidad, este índice han sido utilizados en las últimas décadas para caracterizar la exposición en un gran número de países [8] [17] [18], recurriendo en la mayoría de los casos a datos anuales o mensuales, y solo más recientemente, a datos diarios o incluso horarios.

En este estudio, se han realizado tanto el análisis del índice de lluvia batiente anual (aaDRI), como diario (daDRI). La obtención de los dos indicadores va a permitir identificar posibles correlaciones entre ellos.

De existir la correlación, podríamos partir de meros datos anuales para extrapolar un valor con precisión similar a la que hubiéramos obtenido partiendo de datos diarios en el emplazamiento. Eso lo que nos permitiría es poder caracterizar una exposición de precisión adecuada incluso en emplazamiento con datos climáticos muy limitados (únicamente resúmenes anuales).

- <u>CARACTERIZACIÓN DE LA PRESIÓN EÓLICA SIMULTÁNEA A LA LLUVIA BATIENTE</u>

La presión eólica simultánea a la lluvia batiente es el segundo parámetro fundamental para la penetración de agua atmosférica al interior del cerramiento. Baste como muestra que todos los ensayos utilizados internacionalmente para evaluar la estanqueidad de las soluciones de fachada consideran este parámetro como el conductor de la prueba [19-20]. Así, ante un aporte constante de agua, la máxima diferencia de presión que el cerramiento es capaz de soportar sin presencia de humedad en la cara interior del mismo, determina la prestación de estanqueidad de la solución constructiva.

La diferencia de presión o presión eólica simultánea a la precipitación *DRWP* (Pa) que se produce sobre una fachada de orientación *Θ* (º), puede calcularse mediante la ecuación (3), donde ρ_{aire} (kg/m^3) representa la densidad del aire, U_{10}(m/s) la velocidad del viento y *D* (º) la dirección del viento, únicamente de los registros meteorológicos simultáneos a la lluvia. En este caso, se calcularía la presión eólica simultánea a la precipitación para un **registro diario**:

$$DRWP = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot U_{10}^2 \cdot \cos(D - \theta) \quad (3)$$

El valor medio anual $DRWP_{A\theta}$ (Pa) característico de la exposición a largo plazo, debe calcularse como el promedio de los valores de DRWP obtenidos a lo largo de los años analizados, tal y como indica la ecuación (4). Para ello, en el sumatorio solo se consideran aquellos m registros simultáneos a la lluvia, en los que la dirección del viento genera una presión positiva sobre la fachada de orientación Θ, propiciando la penetración del aporte de agua recibido. De nuevo, ha de realizarse un cálculo independiente para cada posible orientación Θ del cerramiento (en caso de disponer de registros de dirección de viento):

$$DRWP_{A\theta} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot U_{10}^2 \cdot \cos(D-\theta)}{m} \quad (4)$$

- Registro de velocidad media del viento "U_{10}" (m/s).
- Densidad del aire ρ_{aire}(kg/m3).
- Número de registros totales diarios en un año "*m*"
- Dirección del viento "D" (º)
- Orientación de la fachada analizada "ϑ" (º)

Por tanto, el uso de registros meteorológicos referidos a intervalos de corta duración, permitirá obtener estimaciones de DRWP más precisas, al reducirse el error de promedio cometido y poder descartar aquellos registros de viento no simultáneos a la lluvia.

De forma análoga, para caracterizar de forma escalar la presión eólica media simultánea a la lluvia batiente $DRWP_A$ (Pa) en emplazamientos sin registros de dirección de viento, la ecuación (5) promedia el sumatorio del producto de velocidad del viento U_{10} (m/s) y de densidad del aire ρ_{aire} (kg/m^3), de cada uno de los m días con precipitación. Es ésta la formulación que se utiliza en **este estudio**:

$$DRWP_A = \frac{\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot U_{10}^2}{m} \quad (5)$$

- Registro de velocidad media del viento "U_{10}" (m/s).
- Densidad del aire ρ_{aire}(kg/m3).
- Número de años en los que se analiza el DRWP "*N*"

Estos resultados escalares de presión, representan la presión eólica media simultánea al aporte de agua sobre el conjunto de todas las fachadas de un edificio, en cada emplazamiento.

Actualmente pocos países han abordado la realización de estudios exhaustivos de DRWP en un número significativo de emplazamientos [21]. Por ello, la solicitación por humedad en los cerramientos de los diferentes países se ha venido estableciendo únicamente mediante mapas de exposición a la lluvia batiente [22-23], soslayando la relevancia que la presión eólica tiene en el riesgo de penetración de agua a través de la fachada.

En resumen, en este se han utilizado registros meteorológicos referidos a intervalos diarios durante un período de 10 años, soslayando el uso de datos direccionales para ambos casos (tanto WDR como DRWP) debido a la ausencia de registros de dirección de viento, también eliminando el uso del coeficiente empírico "*K*" debido a su alta variabilidad. Se obtiene así un índice de lluvia batiente (m^2/s) o driving rain

index (DRI), y un indicador de presión eólica simultánea DRWP, que permiten comparar de forma aproximada el nivel de exposición a la humedad atmosférica entre diferentes emplazamientos.

- CARACTERIZACION DEL ÍNDICE DE RIESGO DE PENETRACIÓN DEL AGUA.

Como se indicó, la penetración del agua en los materiales se produce como resultado de la combinación simultánea de WDR y DRWP en el cerramiento del edificio. Sin embargo, ambos factores climáticos son independientes entre sí y no pueden ser sumados o comparados de forma inmediata: Un valor alto de aDRI y un valor bajo de DRWP pueden ocurrir simultáneamente (por ejemplo, lluvias intensas acompañadas por vientos ligeros).

Es necesario combinar ambas exposiciones en un solo indicador que sea capaz de evaluar el efecto simultáneo de ambos factores climáticos, para así poder evaluar el riesgo global de penetración de agua en las fachadas en cada sitio.

Para calcular el RIWP, se le asigna un valor entre 0 y 1 a cada factor climatológico, normalizándolo al considerar los valores mínimo y máximo de exposición presentes en las localidades analizadas en el conjunto de emplazamientos considerado (7-8). Estos valores normalizados serán más altos (máximo 1) en las ubicaciones con mayores exposiciones.

El valor normalizado de índice de lluvia batiente diario (daDRI) lo obtendremos de la siguiente manera:

$$daDRI_{normalizado,j} = \frac{daDRI_j - daDRI_{min}}{daDRI_{max} - daDRI_{min}} \quad (6)$$

- El $daDRI_{normalizado,j}$ es el índice de lluvia batiente normalizado correspondiente a cada emplazamiento. La "j" del subíndice indica la estación que se analiza en cada caso. En el caso de la primera estación será $daDRI_{normalizado,1}$ y así sucesivamente.
- El $daDRI_{max}$ es el índice de lluvia batiente de mayor valor de entre todas las estaciones analizadas. El $daDRI_{min}$ por lo tanto será el que menor valor tenga.

daDRI max	21,251
daDRI min	0,494

Estos son los valores máximos y mínimos de índice de lluvia batiente de las 52 estaciones, los cuales corresponden a la estación ubicada en Brocken (Sajonia-Anhalt, Alemania) y en Beerfelden (Hesse, Alemania), respectivamente.

El valor normalizado de la presión eólica combinado a la lluvia batiente (DRWP) lo obtendremos de una manera análoga, siendo los valores máximos y mínimos los correspondientes a las estaciones (Anexo II) :

$$DRWP_{normalizado,j} = \frac{DRWP_j - DRWP_{min}}{DRWP_{max} - DRWP_{min}} \quad (7)$$

La combinación de ambos factores normalizados permite determinar el valor RIWP asociado a cada emplazamiento. Este índice de riesgo indica cuál de las 52 estaciones analizadas en este estudio, está más expuesta a la combinación de estos dos factores que coadyuvan para la penetración de agua atmosférica en las fachadas de los edificios. Se obtendrá de la siguiente manera:

$$RIWP_j = \sqrt{\propto \cdot (daDRI_{normalizado,j})^2 + \beta \cdot (DRWP_{normalizado,j})^2} \quad (8)$$

Finalmente, después de saber los valores máximos y mínimos de ambos factores, se observa que el mayor índice de riesgo de penetración, lo tiene la estación situada en BROCKEN y el menor la estación situada en Beerfelden, resultados que explicaremos en la siguiente sección del estudio.

5. RESULTADOS

En este apartado se presenta un resumen de todos los resultados obtenidos en el desarrollo del trabajo, empezando por la elaboración de detalladas fichas resumen para cada estación, en la que se reflejan todos indicadores analizados (véase Anexo III):

- FICHAS RESUMEN DE LAS ESTACIONES ANALIZADAS.

Con el objetivo de presentar el contenido de cada ficha, se muestra a continuación el ejemplo de la correspondiente a la estación alemana de Hohenspeisenberg, en la región de Weilheim-Schongau (Figura 13).

WEILHEIM-SCHONGAU

ESTACIÓN (1/2):	HOHENPEISENBERG

DATOS ESTACIÓN 0200E (Indicativo)

ALTITUD (m)	977

LATITUD	LONGITUD	X (LONG.)	Y (LAT.)	Huso
+47:48:07	+011:00:43	650652,56	5296247,49	32

AÑOS ANALIZADOS (2012-2021)	10
% DE REGISTROS DIARIOS VÁLIDOS	0,2
DÍAS ANUALES CON LLUVIA BATIENTE	183

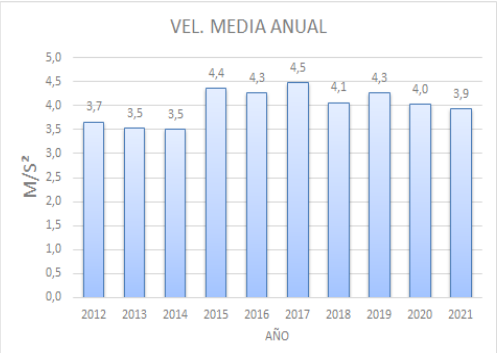
PLUVIOMETRÍA MEDIA ANUAL (mm)	1199
VEL. MEDIA DEL VIENTO (m/s)	4,01
PRESIÓN EÓLICA MEDIA (Pa)	9,64
VEL. MEDIA RACHA DE VIENTO (m/s)	11,65
VEL. VIENTO SIMULTÁNEO A LLUVIA (m/s)	4,55

EXPOSICIÓN A LA PENETRACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA (VALOR ESCALAR)

DRIVING RAIN INDEX daDRI (m2/s)	5,535
DRIVING RAIN INDEX aaDRI (m2/s)	4,819

DRIVING RAIN WIND PRESSURE dDRWP (Pa)	15,363
DRIVING RAIN WIND PRESSURE aDRWP (Pa)	9,703

EVOLUCIÓN ANUAL VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO



EVOLUCIÓN ANUAL PRECIPITACIONES

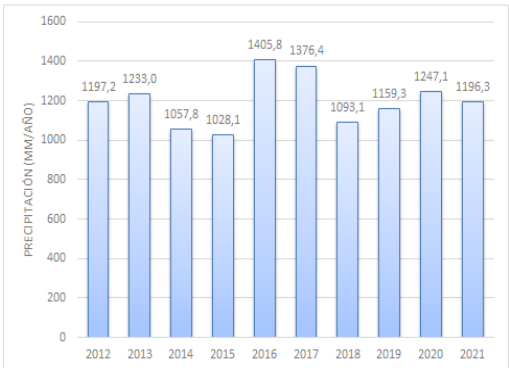


Figura 13. Ficha resumen de todos los resultados obtenidos de este estudio.

En la primera parte de cada ficha resumen, se pueden observar varios resultados. Así, en la cabecera de la ficha se muestra la región donde se encuentra la estación meteorológica analizada. Después se procede a mostrar el nombre de la estación (no es necesariamente el nombre de la ciudad donde está colocada, puede ser el nombre de una montaña o accidente geográfico característico próximo) y datos varios generales como su altitud, coordenadas GMS y coordenadas UTM con su huso horario.

A la derecha, se presentan datos como la pluviometría media anual, la velocidad media del viento, la presión eólica media y la racha de viento media (respecto a los 10 años analizados) y justo debajo, datos relativos a los años analizados, calidad de los registros climáticos disponibles y días anuales en los que se ha registrado algún valor de lluvia batiente.

En la parte media de esta primera página de la ficha, se recogen los índices anuales de lluvia batiente obtenidos a partir de datos anuales (aaDRI) y diarios (daDRI). Del mismo modo, también se puede observar la presión eólica simultánea a la lluvia batiente obtenida mediante datos anuales (aDRWP) y dirarios (dDRWP).

En la parte inferior de esta primera parte de la ficha resumen, se representan dos gráficas que muestran la evolución anual de la velocidad media de viento desde 2012 hasta 2021 (incluido) y la cantidad de precipitaciones anuales durante este período de tiempo.

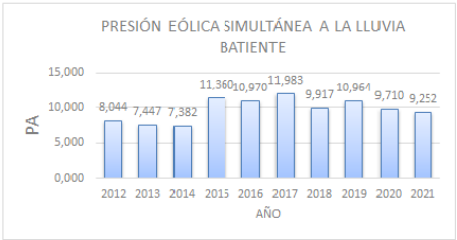
WEILHEIM-SCHONGAU

ESTACIÓN (2/2): **HOHENPEISENBERG**

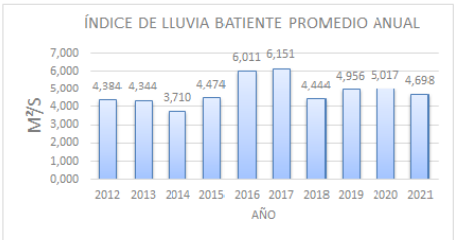
RESUMEN DE DATOS REPRESENTATIVOS ANUALES

Año	Pluviometría (mm/año)	Max. precipitación 24 horas (mm)	Max. vel. viento 1 día (m/s)	Max. Racha 1 día (m/s)
2012	1197,2	53,9	12,3	31,9
2013	1233	57,2	11,2	27,9
2014	1057,8	55,9	11,8	29,1
2015	1028,1	39,8	15,9	42,5
2016	1405,8	81,6	14,4	31,4
2017	1376,4	39,3	13,2	32,8
2018	1093,1	44,3	13,6	37,1
2019	1159,3	104,3	13	33,3
2020	1247,1	76,2	13	40,2
2021	1196,3	38,6	12,7	30,7

EV. ANUAL PRESIÓN EÓLICA SIMULTÁNEA A LA LLUVIA BATIENTE



EVOLUCIÓN ANUAL DEL ÍNDICE DE LLUVIA BATIENTE



ESTIMACIÓN DE VARIABLES METEOROLÓGICAS ASOCIADAS A PERÍODOS DE RETORNO

Precipitación max. 24 h:		Max. Velocidad media diaria de viento:		Max. racha de viento:	
Promedio:	59,1	Promedio:	13,1	Promedio:	33,3
Desviación estandar σ:	20,7036	Desviación estandar σ:	1,2613	Desviación estandar σ:	4,3543
Media de var. reducida uy:	0,4952	Media de var. reducida uy:	0,4952	Media de var. reducida uy:	0,1244
Desv. de var. reducida σy:	0,9496	Desv. de var. reducida σy:	0,9496	Desv. de var. reducida σy:	0,6365
Moda u (GUMBEL):	48,3136	Moda u (GUMBEL):	12,4523	Moda u (GUMBEL):	30,9793
Dispersión β (GUMBEL):	21,8019	Dispersión β (GUMBEL):	1,3282	Dispersión β (GUMBEL):	4,5853

Valor (mm) para periodo de retorno de:		Valor (m/s) para periodo de retorno de:		Valor (m/s) para periodo de retorno de:	
5 años:	81,0	5 años:	14,4	5 años:	37,9
10 años:	97,4	10 años:	15,4	10 años:	41,3
25 años:	118,0	25 años:	16,7	25 años:	45,6
50 años:	133,4	50 años:	17,6	50 años:	48,9
100 años:	148,6	100 años:	18,6	100 años:	52,1
250 años:	168,6	250 años:	19,8	250 años:	56,3
500 años:	183,8	500 años:	20,7	500 años:	59,5

Figura 14.Segunda parte de la ficha resumen de todos los resultados obtenidos de este estudio.

Si se aborda lo contenido en la segunda parte de la ficha resumen, se pueden observar con detalle una selección de los valores máximos de pluviometría media anual, máxima precipitación acumulada en 24 horas, máxima velocidad de viento promedio en 24 horas y de la máxima rachada de viento registrada cada año (viento asociado a una duración de 3 segundos). Todos estos valores máximos anuales posibilitan el cálculo posterior de valores de estas variables asociadas a diferentes periodos de retorno, tal y como se comentará más adelante.

En la parte media de la segunda hoja de la ficha, se representa la evolución anual del indicador **dDRWP** y la evolución anual del índice de lluvia batiente **daDRI. El objetivo de estás gráficas es el de representar los valores de daDRI y DRWP año tras año durante los 10 años analizados y poder observar su evolución en cada estación durante este período de tiempo.**

En la parte final de la ficha se proporcionan diversos resultados sobre los cuales no se ha comentado nada en el estudio hasta ahora, ya que se analizan como resultados complementarios al objetivo principal de nuestro estudio. Así, en esta última parte se analizan valores de precipitación máxima recogida durante 24 horas, de máxima velocidad media diaria de viento y de máxima racha de viento, asociados a diferentes periodos de retorno (recurrencia).

El estudio de periodos de retorno es una técnica matemática de gran utilidad para analizar variables meteorológicas (estocásticas por naturaleza), como precipitaciones, velocidad de viento, temperatura, etc., especialmente si se refieren a valores extremos (la técnica se engloba dentro de la Teoría de los valores extremos). Estos análisis son importantes para estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos climáticos extremos futuros y ayudan en la toma de decisiones sobre infraestructuras, planificación urbana, agricultura, gestión de recursos hídricos y otras áreas.

Para calcular los periodos de retorno de las variables meteorológicas es necesario disponer de series históricas de datos de dichas variables. En este caso, se tienen registros diarios de las tres variables meteorológicas comentadas anteriormente. A partir de estos datos, se aplican técnicas estadísticas (Figura 14) para determinar la distribución de probabilidad adecuada y estimar valores extremos.

Entre las distribuciones más utilizadas se encuentran la distribución Gumbel (Figura 15), la distribución Weibull y la distribución Pearson tipo III. En este caso decidimos seguir el método Gumbel, ya que es el históricamente más extendido en nuestro país para el análisis de este tipo de variables asociadas a periodos de retorno.

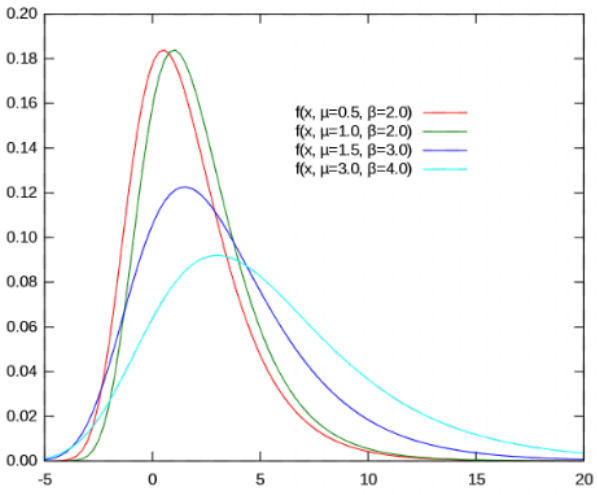


Figura 15.Ejemplo representativo de la distribución de Gumbell.

La distribución de Gumbel (refiriéndose a los períodos de retorno) se puede realizar mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{RP} = 1 - e^{-e^{\frac{-(x-\mu)}{\beta}}} \qquad (9)$$

El valor de la variable para ese supuesto RP quedaría despejado de la siguiente manera:

$$x = \mu - \beta(l_n\left(-l_n\left(1 - \frac{1}{RP}\right)\right)) \quad (10)$$

- Siendo RP el período de retorno en el que queremos recibir un valor de la variable "x".
- "x" es la variable que queremos analizar, en este caso, la cantidad de precipitaciones, velocidad de viento y racha de viento.
- μ es la ubicación del valor central de la distribución.
- β es un parámetro de escala que determina la dispersión de los datos.

En este caso, μ y β, son resultados de los siguientes cálculos:

$$\mu = \bar{x} - \mu_y \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (12)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} \quad (13)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (14)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{N}} \quad (15)$$

$$\mu_y = \frac{\sum_{i=1}^{N} -l_n(l_n\left(\frac{N+1}{i}\right))}{N} \quad (16)$$

- σ_x, es la desviación estándar
- σ_y, es la desviación estándar de la variable reducida
- μ_y, media de la variable reducida
- $\bar{x}$, promedio de los valores máximos que vemos en la ficha resumen
- N, nº de datos (nº de máximos, o de años en este caso)

Una vez que se ha determinado la distribución adecuada de los datos, es posible calcular el valor de retorno para diferentes períodos de tiempo. Por ejemplo, se puede estimar cuál es la precipitación esperada para una lluvia que ocurre, en promedio, una vez cada 50 años o la temperatura máxima que se alcanzaría, en promedio, una vez cada 100 años.

Es importante enfatizar que el cálculo de los períodos de retorno está sujeto a incertidumbres y depende de la calidad y cantidad de datos disponibles. Además, con el cambio climático, los patrones de ocurrencia de eventos extremos pueden cambiar, lo que hace necesario considerar escenarios futuros en el análisis de los períodos de retorno de las variables meteorológicas. Del mismo modo, no debe olvidarse que la estimación es un mero valor estadístico, siendo posible que se superen varias veces los valores marcados

antes del paso de periodo de retorno caracterizado, así como que dicho valor no se alcance en todo el periodo marcado por el periodo de retorno.

- MAPAS DE EXPOSICIÓN (Alemania y Dinamarca).

Ambos mapas han sido elaborados mediante el software Allplan BIM 2020. Para ello, se ha realizado un modelado digital del terreno, en el cual las coordenadas X e Y de cada punto se corresponden con las coordenadas UTM de cada estación analizada (incluidas las situadas en el sur de Suecia y Noruega) y el correspondiente punto de altura del terreno Z ha sido sustituido por el valor de exposición a representar. De este modo, se han obtenido curvas de nivel (isolíneas) que, en lugar de representar altura topográfica, representan niveles de exposición a lo largo del territorio analizado.

El primer mapa mostrado representa el índice de lluvia batiente utilizando registros meteorológicos diarios o daDRI:

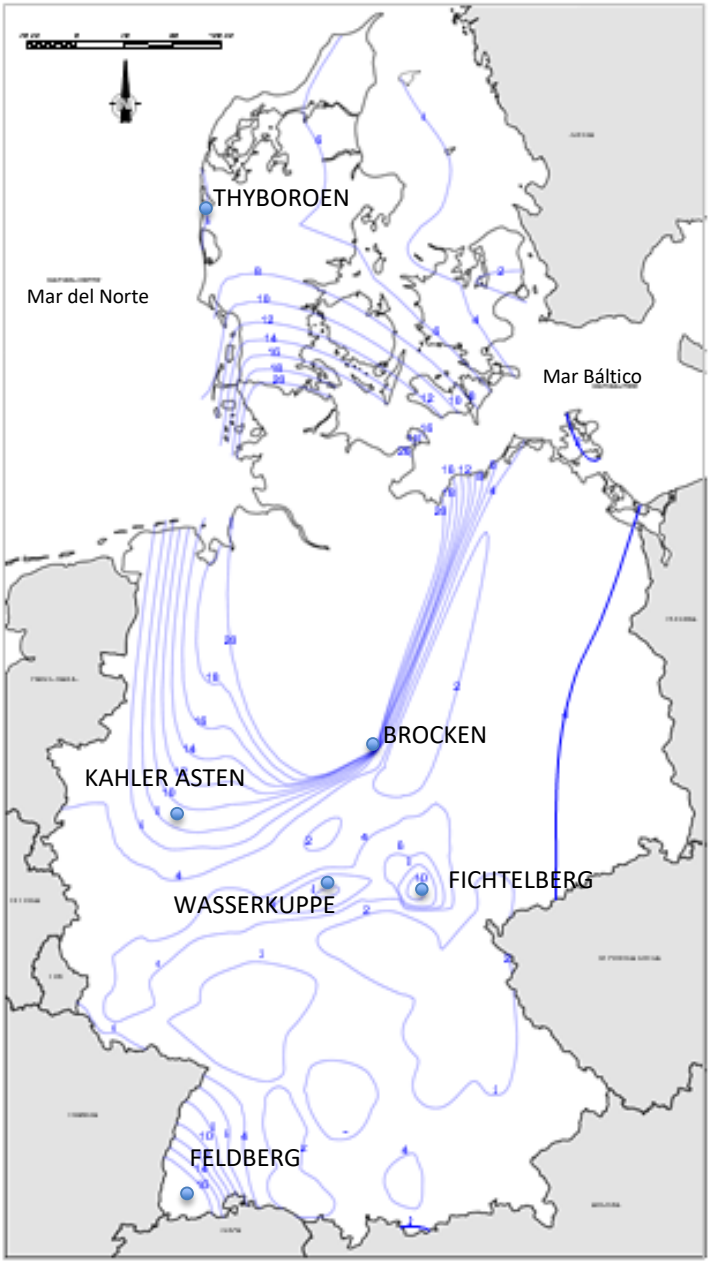


Figura 16. Mapa de exposición media anual a la lluvia batiente

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, debido a problemas en la descarga de datos de estaciones con altitud comprendida entre 0 y 250 msm, no se pudieron obtener registros meteorológicos de un gran número de estaciones en el norte de Alemania. Este hecho provoca una menor precisión en la caracterización de la exposición en esta zona del país, con grandes áreas caracterizadas por un mismo nivel de exposición.

En general, se observa una mayor exposición cerca de la costa del Mar del Norte, especialmente en torno a la península de Jutlandia. Hacia el interior, la exposición a la lluvia batiente decrece y en la zona montañosa del sur de Alemania esta exposición se ve fuertemente condicionada por la orientación de los valles alpinos y la influencia del viento dominante en los mismos.

Para realizar un análisis más pormenorizado de este mapa de exposición, se presentan seis de los valores máximos daDRI recopilados en el Anexo **I**:

- Estación de BROCKEN (1142 msm), con un valor de daDRI de media de 21,251 m^2/s, se sitúa entre la ciudad de Hannover y Leizpig. Es una estación situada en una zona de montaña, de ahí que su altitud sea de 1142 msm y lidera con bastante diferencia el ranking de resultados de exposición media anual a la lluvia batiente. En el mapa de exposición que se observa arriba (Figura 16) se puede ver que la curva de nivel de 20 m^2/s, está en la zona centro-norte, que es la zona donde se encuentra esta estación.

- Estación de FELDBERG (1490 msm), con un valor de daDRI de media de 18,001 m^2/s, se encuentra en una de las zonas de Alemania con mayor número de precipitaciones, ubicada en la zona izquierda del sur del país (Figura 16). Es una zona dominada por el sistema montañoso de los Alpes, donde se encuentran las montañas más altas del país.

- Estación de FICHTELBERG (1213 msm), con un valor de daDRI de media de 9,818 m^2/s, se encuentra en la zona del centro-este de Alemania. Cabe destacar, que al igual que las dos estaciones anteriores, también se encuentra en zona montañosa.

- Estación de KAHLER ASTEN (839 msm), con un valor de daDRI de media de 8,966 m^2/s, y se encuentra en el pico de una montaña llamada Kahler Asten (cerca de la ciudad de Winterberg). Se encuentra también localizada al lado de Dortmund, en una zona montañosa, al igual que los casos anteriores. Cabe destacar que al igual que en las anteriores estaciones, si se analiza el climograma y el mapa topográfico mostrado en el apartado 3 de alcance de este estudio, se vería que se registran entre 1000 y 1500 mm/año de precipitaciones y que es una zona montañosa.

- Estación de WASERKUPPE (921 msm), con un valor de daDRI de media de 8,077 m^2/s y al igual que la anterior, se encuentra en el pico de una montaña con el mismo nombre, Waserkuppe, ubicada en la ciudad de Poppenhausen, en el centro de Alemania. Si se observa el climograma (Figura 7) ocurre lo mismo que en los casos anteriores: la cantidad de precipitaciones ronda entre los 1000 y 1500 mm/año y se observa que es zona montañosa.

- Estación de THYBOROEN (52,4 msm), con un valor de daDRI de media de 5,916 m^2/s. En este caso, no hemos escogido esta estación por su valor de daDRI medio, sino porque es la única estación analizada en este estudio en Dinamarca. No tiene una gran altitud, pero a pesar de ello, tiene un valor de daDRI bastante elevado. Esto es posible debido a que está situado en una zona costera y debido a ello, las corrientes marinas pueden afectar la velocidad y dirección del viento en la costa. Al moverse a lo largo de la costa, las corrientes pueden influir en el flujo de aire, acelerándolo o desviándolo. Esto puede resultar en vientos más intensos y turbulentos en la zona costera.

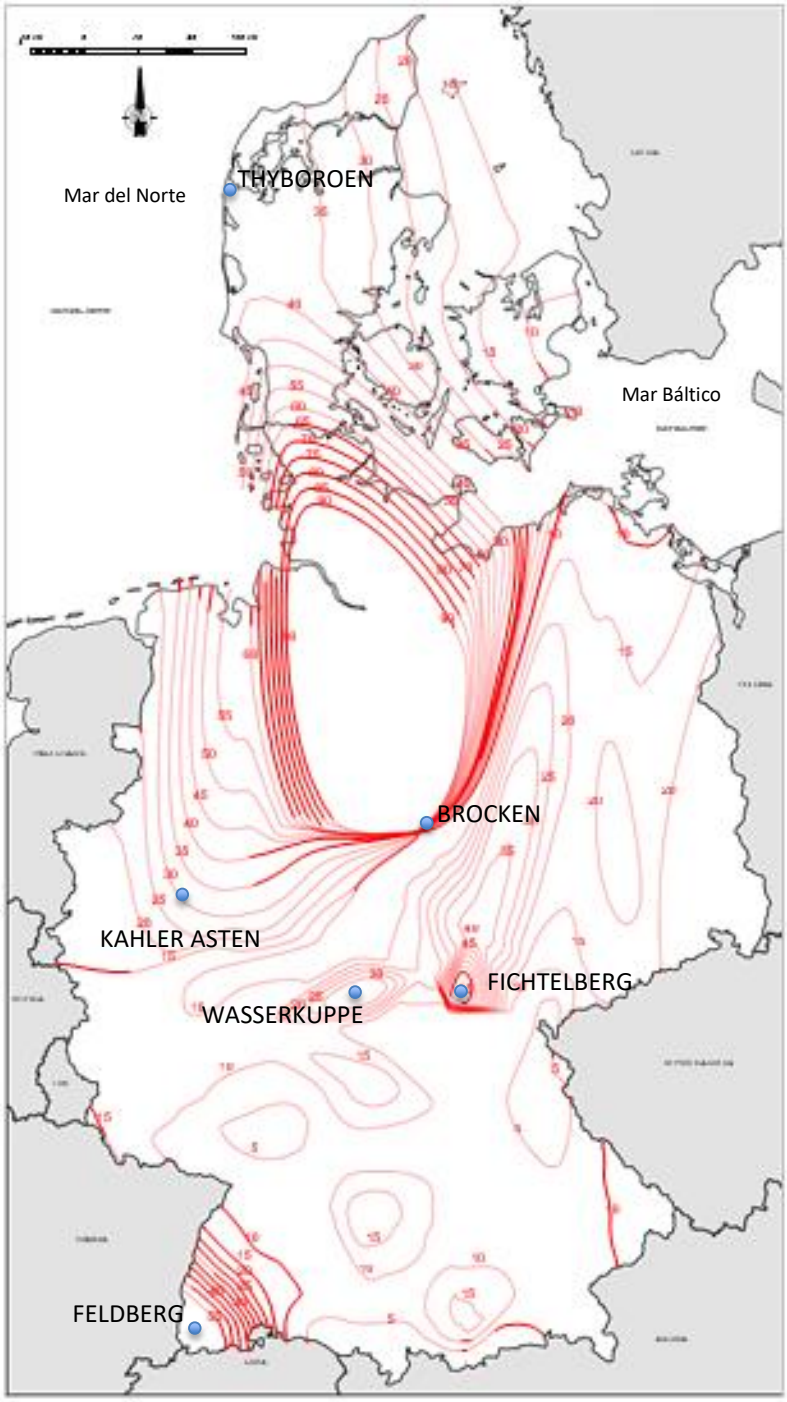


Figura 17. Mapa de exposición media anual de la presión eólica simultánea a la lluvia batiente.

Las mismas seis estaciones analizadas anteriormente son también las que presentan una mayor exposición a la presión eólica simultánea a la lluvia batiente o DRWP. Este hecho se relaciona con la topografía montañosa en la que se ubican, que tiende a incrementar la velocidad del viento. En el caso de la estación en Dinamarca, son los fuertes vientos costeros que acompañan a las borrascas los responsables de incrementar el valor de DRWP (asociados a la influencia de las corrientes marinas, el gradiente de presión o el efecto de convergencia).

Los valores de DRWP asociados a cada una de las estaciones son los siguientes:

- Estación de BROCKEN, con un valor medio anual de presión eólica simultánea a la lluvia batiente de 93,711 Pa, siendo esta la de mayor valor.

- Estación de FICHTELBERG, con un valor medio anual de presión eólica simultánea a la lluvia batiente de 65,640 Pa.

- Estación de FELDBERG, con un valor medio anual de presión eólica simultánea a la lluvia batiente de 56,874 Pa.

- Estación de THYBOROEN (Dinamarca), con un valor medio anual de presión eólica simultánea a la lluvia batiente de 37,197 Pa.

- Estación de WASSERKUPPE, con un valor medio anual de presión eólica simultánea a la lluvia batiente de 34,502 Pa.

- Estación de KAHLER ASTEN, con un valor medio anual de presión eólica simultánea a la lluvia batiente de 30,908 Pa.

Como se puede observar, el orden de mayor a menor que se ha escogido para elaborar los anteriores puntos, para el DRWP, no es el mismo que el caso del daDRI, esto puede ser debido a la topografía que tiene cada ubicación de cada estación analizada.

Cabe destacar por ejemplo, el caso de THYBOROEN, la cual se encuentra en último lugar para los datos daDRI, sin embargo el resultado de la presión eólica simultánea a la lluvia batiente, es mucho mayor el de esta estación que el de las estaciones de WASSERKUPPE o KAHLER ASTEN.

Esto puede ser debido a que la estación de THYBOROEN, nombre que da lugar a un pueblo pesquero en la zona de costa de Dinamarca. Debido a esto, son los fuertes vientos costeros que acompañan a las borrascas los responsables de incrementar el valor de DRWP (asociados a la influencia de las corrientes marinas, el gradiente de presión o el efecto de convergencia).

- <u>RISK INDEX OF WATER PENETRATION.</u>

A continuación, se representa el valor de riesgo comparativo de penetración de humedad atmosférica en fachadas correspondiente al conjunto de emplazamientos analizados. Para ello, los valores normalizados de ambas variables se han representados en ambos ejes de la gráfica, representando el valor RIWP la distancia de cada punto al origen.

A su vez, la bisectriz representada muestra la mayor o menor influencia de ambos factores en este riesgo de penetración: los puntos (estaciones) situados por debajo de la bisectriz tienen un riesgo de penetración más asociado a elevados aportes de agua sobre los cerramientos, mientras que los situados por encima de la bisectriz deben el riesgo de penetración de agua principalmente a la elevada presión eólica simultánea a los eventos de precipitación.

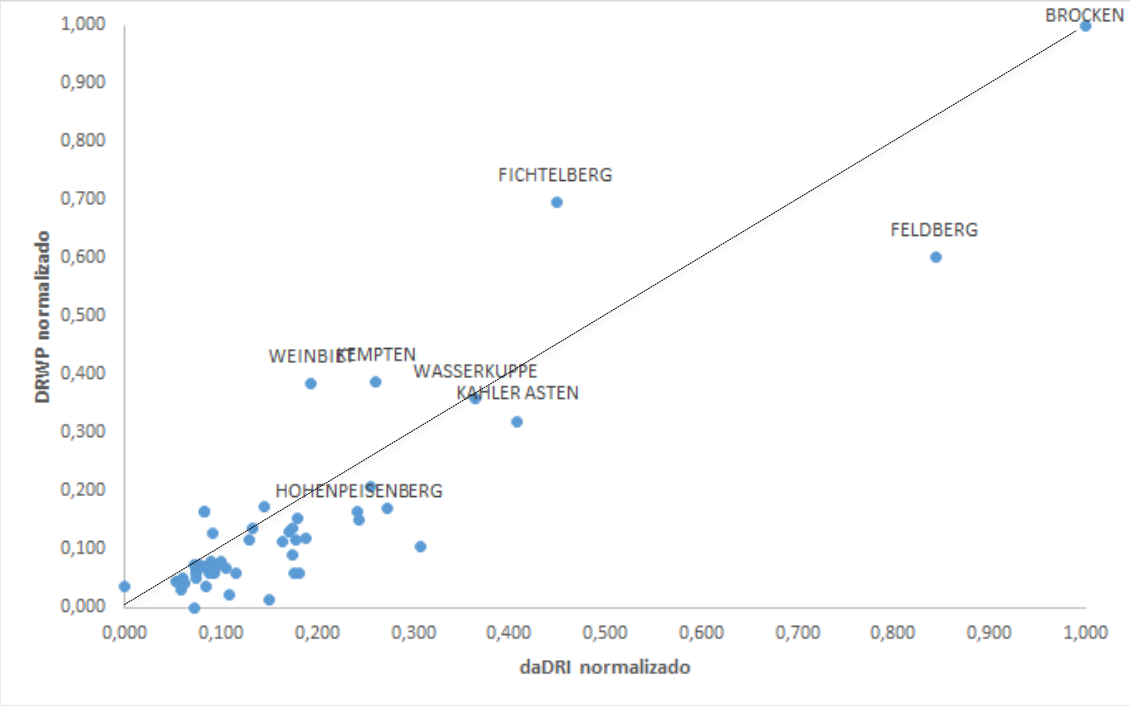


Figura 18. Gráfica representativa de todos los índices de exposición a la penetración de la humedad.

Como se puede observar, las estaciones con mayor valor de RIWP son las que hemos comentado anteriormente en el apartado de los mapas de exposición, ya que al fin y al cabo, para poder calcular tanto el daDRI normalizado como el DRWP normalizado, se combinan los valores de daDRI y DRWP de dichas estaciones.

Al respecto, se observa como el mayor índice de riesgo de penetración se identifica en la estación situada en BROCKEN (centro de Alemania) y el menor en la estación situada en BEERFELDEN, **resultados que explicaremos en la siguiente sección del estudio.**

La estación nombrada como BEERFELDEN, está situada al lado de un municipio llamado por el mismo nombre, que se encuentra en el distrito de Odenwald, en el estado federado de Hesse. Con una elevación de 450 msm, se podría decir que se encuentra en una zona de montaña, pero no muy exagerada (Figura 11). A priori, debido a la altura que tiene esta estación, sus valores no deberían ser los más bajos, ya sea de daDRI, DRWP, velocidad del viento, cantidad de precipitaciones, etc…

6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este último apartado del trabajo se van a realizar una serie de comparaciones, de entre todos los resultados de todas estaciones analizadas, esperando obtener una serie de correlaciones entre las diferentes variables analizadas e indicadores identificados.

Para determinar si dos variables presentan una buena correlación, se puede calcular mediante la función CORREL en Excel. El resultado puede variar entre 0 y 1 (valor del coeficiente de correlación).

Un coeficiente de correlación de 1 indica una correlación positiva perfecta, lo que significa que cuando una variable aumenta, la otra también lo hace en proporción constante. Un coeficiente de correlación de 0 indica que no hay una relación lineal entre las variables. Excel también puede determinar los coeficientes de determinación de regresiones logarítmicas, potenciales, etc…

Pero en este caso, realizaremos un análisis lineal de estos conjuntos de variables que se verán a continuación.

- DaDRI vs Pluviometría media.

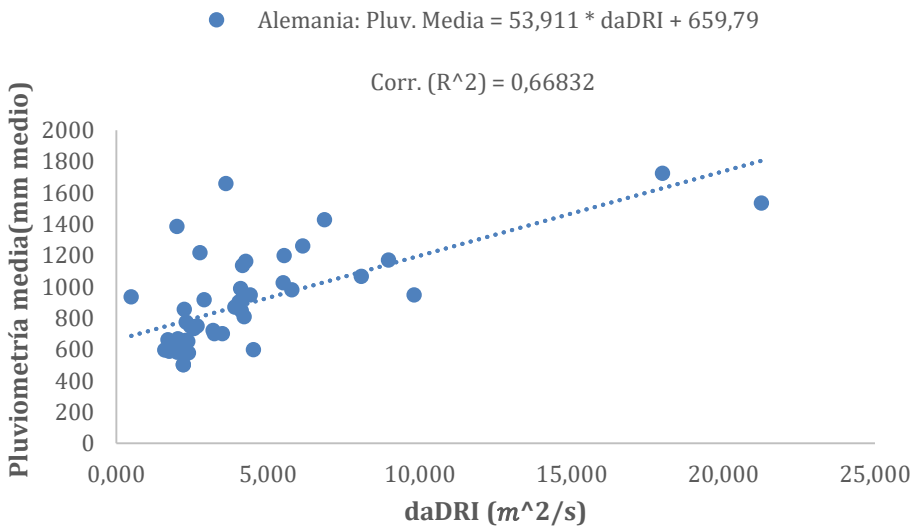


Figura 19. Gráfica representativa de la correlación entre daDRI y la Pluv. Media.

Como se puede observar, ambas variables mantienen una correlación débil, lo que indica que la cantidad de precipitación atmosférica recibida en las fachadas verticales de los edificios no puede extrapolarse a partir del mero resultado de pluviometría registrado sobre la superficie horizontal.

Este resultado demuestra la necesidad de llevar a cabo análisis como el planteado en este trabajo, considerando la simultaneidad entre registros de viento y lluvia con el fin de caracterizar indicadores de lluvia batiente.

- daDRI VS aaDRI.

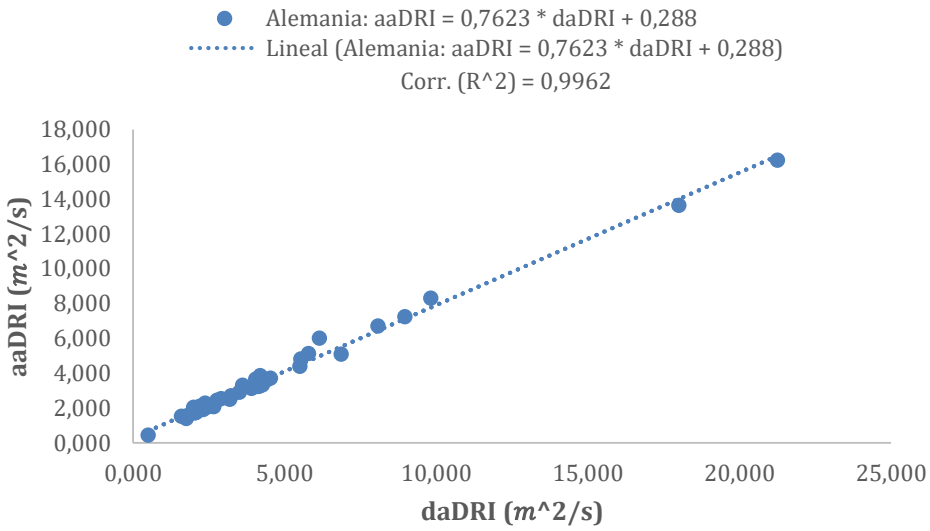


Figura 20. Gráfica representativa de la correlación entre daDRI y aaDRI.

En el caso de correlación existente entre los índices de lluvia batiente analizados a partir de registros diarios y anuales, se observa que se obtiene una gran correlación (casi perfecta, con un valor muy próximo a 1).

Esta correlación casi perfecta sugiere la posibilidad de extrapolar el índice daDRI (de una precisión muy superior al obtenido mediante datos anuales), a partir de uno calculado con datos muy limitados, como es el caso de resúmenes anuales de precipitación y velocidad de viento (aaDRI).

La regresión identificada permite a su vez extender en el futuro el ámbito del estudio a un número mucho mayor de emplazamientos repartidos por todo el país (todos aquellos que al menos cuenten con registros medios anuales de ambas variables), lo que permitirá mejorar la definición de los mapas de exposición aquí presentados, al contar con un número mucho mayor de puntos de interpolación.

- dDRWP vs aDRWP

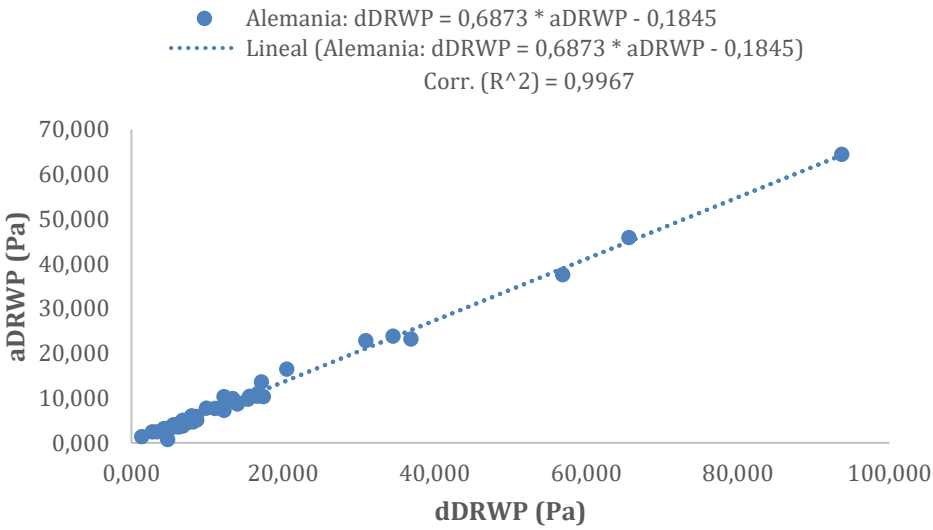


Figura 21. Gráfica representativa de la correlación entre dDRWP y aDRWP.

En este tercer caso, se analiza la correlación entre las dos presiones eólicas simultáneas a la lluvia batiente o DRWP (driven rain wind pressure) analizadas a partir de registros meteorológicos diarios y anuales.

Al igual que la anterior comparación, en este caso también se obtiene un coeficiente de correlación casi perfecto, con un valor de 0,9967, faltando cuatro milésimas para haber obtenido una correlación perfecta entre ambas variables.

Como en el caso anterior, este elevado coeficiente de determinación sugiere la posibilidad de extrapolar el índice dDRWP (de una precisión muy superior al obtenido mediante datos anuales), a partir de uno calculado con datos muy limitados, como es el caso de resúmenes anuales de presión eólica y velocidad del viento simultáneo a la lluvia batiente (aDRWP).

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la precisión de la extrapolación dependerá en gran medida de la calidad y cantidad de los datos disponibles. Es importante destacar que la extrapolación siempre conlleva cierto grado de incertidumbre, especialmente cuando se realizan proyecciones más allá del rango de los datos observados. Por lo tanto, es fundamental tener en cuenta las limitaciones de los datos disponibles y no considerar las extrapolaciones como predicciones precisas, sino más bien como estimaciones aproximadas que pueden ayudar a obtener un valor de exposición en aquellos lugares en los que no es posible acometer un análisis más preciso.

- dDRWP vs Velocidad media del viento.

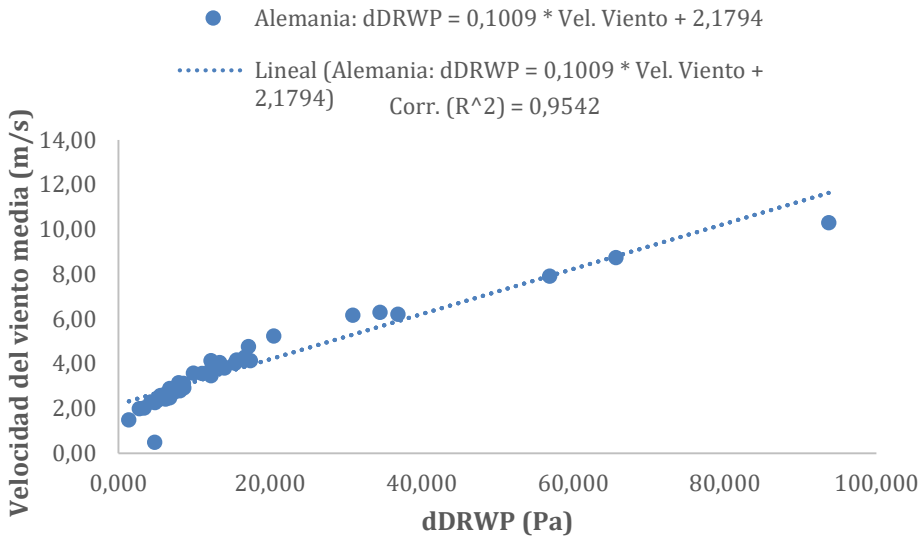


Figura 22. Gráfica representativa de la correlación entre dDRWP y Vel. Media del viento.

Por último, se ha realizado una comparación entre la velocidad media del viento (o presión eólica media, ya que ambas variables son proporcionales) con la variable de la lluvia batiente simultánea a la presión eólica dDRWP. Como se puede observar, no se obtiene una correlación tan perfecta como en los otros casos analizados.

No obstante, se podría deducir que la correlación entre ambas variables es lo suficientemente fuerte como para poder extrapolar el valor del dDRWP a partir del simple valor de la velocidad del viento, en caso de no contar con registros simultáneos de velocidad de viento y precipitación en la estación analizada.

Estas 4 comparaciones, se han llevado a cabo con la herramienta de Microsoft, Excel (hoja resumen presentada en el Anexo I), la cual permite obtener estas regresiones sin necesidad de realizar ningún cálculo a mano.

Otra manera de determinar la magnitud de la correlación existente, en el caso de que no existiera la opción en Excel de obtenerlo directamente gracias a los cálculos del software, sería el cálculo manual que se presenta a continuación:

I. Calcular la media (promedio) de ambas variables.
II. Restar la media de cada valor de las variables para obtener las desviaciones de cada valor respecto a la media.
III. Multiplicar cada par de desviaciones correspondientes de las variables.
IV. Sumar todos los productos obtenidos en el paso anterior.
V. Calcular la desviación estándar de cada variable y multiplícarla para obtener la desviación estándar de la muestra.
VI. Dividir la suma de los productos de las desviaciones por el producto de las desviaciones estándar de las variables.
VII. El resultado es el coeficiente de correlación de **Pearson**.

Es importante destacar que el coeficiente de correlación de Pearson solo mide la relación lineal entre las variables y no captura relaciones no lineales. Además, no implica causalidad entre las variables, solo muestra la fuerza y la dirección de la relación lineal.

- daDRI vs Altitud de cada estación.

Uno de los aspectos que parecen deducirse de las estaciones más expuestas es que cuanta mayor es la altitud de cada estación, mayor es el valor tanto de daDRI como de DRWP. En cierto modo, esta percepción es razonable, ya que en entornos montañosos existe una mayor probabilidd de que se puedan dar elevadas velocidades de viento y mayores precipitaciones. Esta hipotética correlación se analiza a través de la siguiente gráfica:

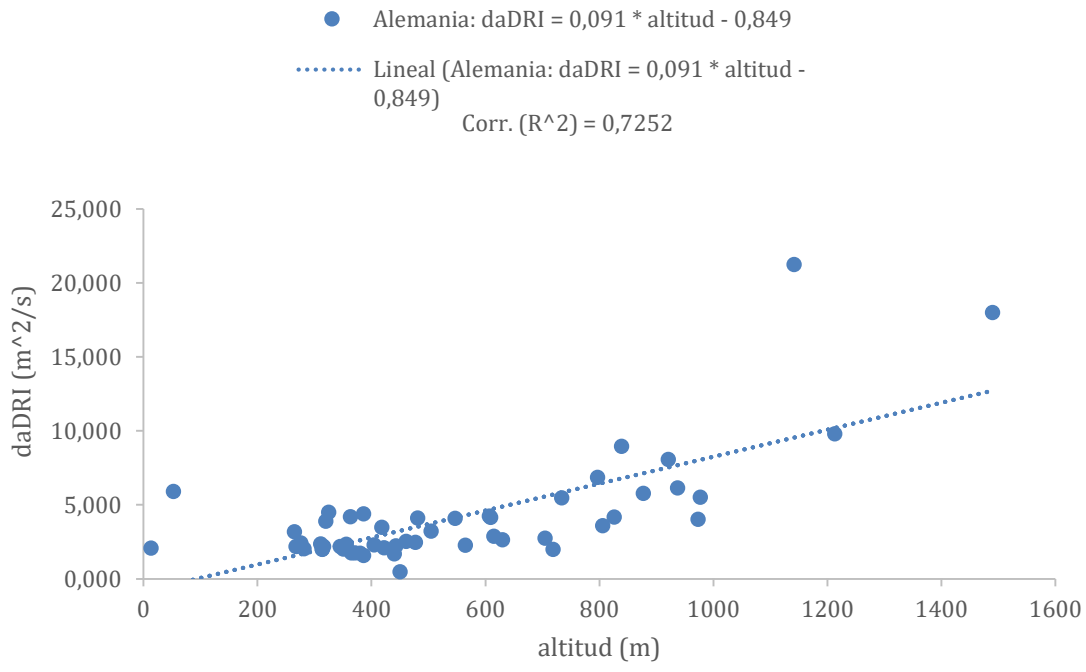


Figura 23. Gráfica representativa de la correlación entre daDRI y altitud (m).

Como se observa, es posible identificar una cierta correlación entre la lluvia batiente recibida por las fachadas y la altitud a la que se encuentra el emplazamiento, si bien también existen emplazamientos donde no se cumple esta premisa.

- DRWP vs Altitud de cada estación.

En este último caso, se analizará la correlación entre el valor de DRWP y la altitud de cada estación:

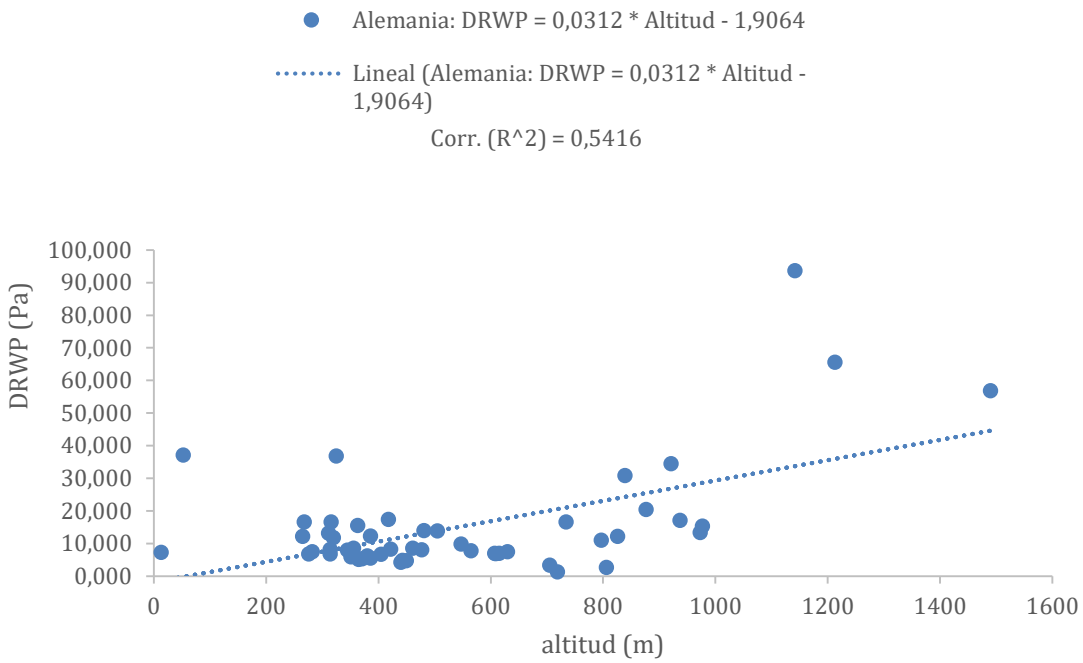


Figura 24. Gráfica representativa de la correlación entre DRWP y altitud (m).

En contra de lo esperado, en este último caso, la correlación entre ambas variables disminuye significativamente. Se puede concluir por tanto que, si bien existe cierta correlación, la altitud no puede ser tomada como una factor decisivo para determinar el nivel de exposición de un emplazamiento.

- Valores RIWP de todas las ubicaciones analizadas.

NOMBRE	daDRI_norm	DRWP_norm	RIWP
HOHENPEISENBERG	0,243	0,152	0,286
BINDERSLEBEN	0,083	0,165	0,185
FICHTELBERG	0,449	0,696	0,828
WURZBURG	0,083	0,165	0,185
HOF	0,086	0,070	0,111
SAARBRUCKEN	0,164	0,114	0,200
NURNBERG	0,073	0,074	0,104
STRAUBING	0,074	0,050	0,089
AUGSBURG	0,099	0,078	0,127
KONSTANZ	0,084	0,038	0,092
KEMPTEN	0,109	0,022	0,111
KAHLER ASTEN	0,408	0,320	0,519
BROCKEN	1,000	1,000	1,414
PETRISBERG	0,130	0,118	0,175
STUTTGART	0,061	0,043	0,075
STUTTGART-SCHNARRENBERG	0,074	0,059	0,094
FELDBERG	0,843	0,601	1,036
FREUDENSTADT	0,307	0,105	0,324
GERA-LEUMINTZ	0,090	0,129	0,157
OBERSTDORF	0,150	0,015	0,151
OHRINGEN	0,094	0,059	0,111
REHENSBURG	0,062	0,041	0,074
STOTTEN	0,241	0,166	0,292
WASSERKUPPE	0,365	0,359	0,512
WEIDEN	0,058	0,031	0,066

NOMBRE	daDRI_norm	DRWP_norm	RIWP
GARMISCH-PARTENKIRCHEN	0,072	0,000	0,072
BAD HERSFELD	0,076	0,065	0,100
KALL-SISTIG	0,132	0,136	0,190
BAD KISSINGEN	0,074	0,066	0,100
KLEINER FELDERBERG/TAUNUS	0,178	0,117	0,213
KLIPPENECK	0,171	0,130	0,215
LEINEFELDE	0,090	0,078	0,119
BAD MARIENBERG	0,173	0,092	0,197
MEMMINGEN	0,116	0,061	0,131
MEMMINGEN (FLUGPLATZ)	0,104	0,067	0,124
BEERFELDEN	0,000	0,037	0,037
MUHLDORF	0,087	0,059	0,105
NEUBURG/DONAU	0,060	0,052	0,080
PLAUEN	0,053	0,045	0,070
SCHIERKE	0,177	0,061	0,187
SCHMUCKE	0,272	0,171	0,322
BERUS	0,179	0,154	0,236

Como se puede observar en las tablas anteriores, relativas a los valores del índice de riesgo de penetración de humedades, la mayoría de estos valores están por debajo del 0,4, aunque sí que se pueden observar 5 o 6 estaciones en concreto (comentadas ya en el apartado de resultados) que destacan por su elevado valor de RIWP.

Estas estaciones son BROCKEN, con un RIWP de 1,414; FELDBERG con un RIWP de 1,036; FICHTELBERG con un RIWP de 0,828; WASSERKUPPE con un RIWP de 0,519; y por último KAHLER ASTEN con un RIWP de 0,512. Estos elevados valores de riesgo de penetración de humedad indican una preocupante combinación de aporte de agua en estado líquido y presión eólica simultánea sobre las fachadas, que debe resolverse mediante requerimientos de diseño que proporcionen una mayor estanquidad comparativa respecto del resto de emplazamientos analizados en el estudio.

Al contrario, la estación de BEERFELDEN, con el menor valor RIWP de la base muestra analizada, tiene menor riesgo de penetración de la humedad atmosférica, debiendo asignársele los requerimientos de diseño más laxos o menos exigentes.

7. CONCLUSIONES

Los problemas aparejados a la penetración inadecuada de agua atmosférica en las fachadas de los edificios conllevan severos perjuicios económicos y dificultan garantizar la salubridad y habitabilidad de las estancias interiores en las que viven seres humanos o animales, a los cuales, esta excesiva humedad ambiental puede acarrearles serios problemas de salud.

Este estudio se ha enfocado en analizar un aspecto previo a cualquier decisión de diseño relativa a la estanquidad de las fachadas: caracterizar con precisión la exposición ambiental a la que cada fachada deberá enfrentarse. Para ello, se han utilizado los datos recopilados y disponibles de forma libre y gratuita en la base de datos *European Climate Assessment &* Dataset Project (ECA&D).

El análisis de estos datos ha permitido establecer una primera caracterización de la exposición de las fachadas alemanas y danesas ante la penetración de humedad atmosférica. Esta caracterización, basada en el estudio escalar de registros diarios se sitúa en la línea de estudios similares realizados en el ámbito internacional y supera con creces la precisión proporcionada por tradicionales análisis basados en recopilaciones de datos climáticos mensuales o incluso anuales.

Durante el estudio se ha caracterizado tanto el aporte de agua atmosférica sobre las fachadas, como la presión simultánea a este aporte de agua, combinando su efecto mediante un indicador de riesgo de penetración. En conjunto, los tres indicadores han permitido obtener una visión global de la solicitación existente sobre las fachadas de ambos países.

Los resultados del estudio demuestran que el índice de lluvia batiente varía significativamente en diferentes regiones. Esto indica la importancia de realizar mediciones locales y tener en cuenta las variaciones temporales para obtener una caracterización precisa. En concreto, las mayores exposiciones se han identificado en las estaciones de BROCKEN, KAHLER ASTEN, FELDBERG, FICHTELBERG y WASSERKUPPE, zonas todas ellas caracterizadas por una topografía montañosa. En cambio, las regiones las cuales están situadas en zona de llanuras o zonas que no están muy próximas a las zonas de costa del norte de Alemania, se encuentran sometidas a exposiciones muchos menores.

Sin embargo, en el caso de la única estación danesa analizada, a pesar de no encontrarse en una región en la que predomina la montaña, está situada en la zona costera del oeste del país, lo cual conlleva que se produzcan borrascas y tormentas lo que conlleva que aumente la velocidad y presión del viento.

En conjunto, los mapas elaborados, junto con las fichas de resultados relativas a cada uno de los emplazamientos analizados, ofrecen pautas nítidas para imponer exigencias de diseño ajustadas a la exposición presente en cada lugar de ambos países, si bien sería recomendable mejorar la caracterización de la zona centro y norte de Alemania obteniendo acceso a datos de un mayor número de emplazamientos en estas regiones. En este sentido, las regresiones identificadas en el apartado 6 y que permiten extrapolar precisos indicadores de exposición a partir de datos anuales (habitualmente disponibles en la mayoría de emplazamientos), permitirán ampliar el análisis presentado a un mayor número de emplazamientos con registros climáticos limitados, permitiendo mejorar en el futuro la caracterización realizada de todo el territorio de ambos países.

En resumen, esta caracterización de la exposición ha de posibilitar en el futuro establecer criterios de diseño más adecuados para las fachadas de los edificios, atendiendo a los materiales utilizados, detalles de construcción, sistemas de drenaje, protecciones adicionales, entre otros. Todos estos resultados han de contribuir a mejorar en el futuro el diseño de fachadas en edificios de ambos países analizados, ajustando sus prestaciones de estanquidad a las solicitaciones realmente presentes.

A nivel personal, la realización de este trabajo me ha permitido aumentar mis conocimientos sobre un campo totalmente desconocido, ya que lo que he realizado a lo largo de este último tramo de mi carrera, no tiene mucho en común con este tema de estudio. Sin embargo, poder trabajar sobre este tema y realizar un proyecto de este tema, ha provocado un cambio de pensamiento sobre lo que se puede llegar a abordar en este grado de Ingeniería Mecánica.

A su vez, el realizar este estudio de este calibre, con un tutor como el que he tenido, me ha permitido tener todavía una mayor cantidad de conocimientos sobre este tema, ya que mi tutor, domina a la perfección este campo al haber realizado varios estudios del mismo tipo en diferentes zonas del mundo y esto me ha permitido que las respuestas por su parte a mis dudas, fueran breves y concisas. De este trabajo me llevo el conocimiento de un gran profesional en todo el ámbito de la Ingeniería de la Construcción y un repertorio de conocimientos sobre la penetración inadecuada de agua atmosférica y los perjuicios económicos y dificultad de garantizar la salubridad y habitabilidad de las estancias interiores provocadas por esta penetración de humedad atmosférica.

8. REFERENCIAS

[1] Broto, C. (2006). Enciclopedia Broto de las patologías de la construcción. Barcelona: Links Barcelona, S.A.

[2] Del Coz, J.J., Rabanal, F.P., García, P.J., Domínguez, J., Rodríguez, B., Pérez, J.M. (2013). Hygrothermal properties of lightweight concrete: Experiments and numerical fitting study. Construction and Building Materials, 40:543-555, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.045

[3] Beissier, (29/03/2021). https://blog.beissier.es/2021/03/29/tipos-de-humedades-clasificacion-origen-y-solucion/

[4] World Health Organization. (2011). Environmental burden of disease associated with inadequate housing. Methods for quantifying health impacts of selected housing risks in the WHO European Region. Copenhagen: World Health Organization.

[5] 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, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2004.06.003

[6] HumeIngenieria, Deterioro de fachadas por el agua de la lluvia (29/04/2019), https://humeingenieria.es/blog/deterioro-de-fachadas-por-el-agua-de-lluvia/

[7] Cornick, S.M., Lacasse, M.A. (2005). A review of climate loads relevant to assessing the watertightness performance of walls, windows, and wall-window interfaces. Journal of ASTM International, 2(10): 1-16, doi: http://dx.doi.org/10.1520/JAI12505

[8] Hoppestad, S. (1955). Slagregn i Norge (Lluvia batiente en Noruega, en noruego). Report no. 13. Oslo: Norwegian Building Research Institute.

[9] Lacy, R.E. (1965). Driving-rain maps and the onslaught of rain on buildings. En Proceedings of RILEM/CIB symposium on moisture problems in buildings. Helsinki.

[10] Straube, J. F., & Burnett, E. F. P. (2000). Simplified prediction of driving rain deposition. Proceedings 1st International Building Physics Conference. Eindhoven: International Association of Building Physics, pp. 375–382

[11] Blocken, B., Carmeliet, J. (2008). Guidelines for the required time resolution of meteorological input data for winddriven rain calculations on buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96(5): 621-639, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.008

[12] Blocken, B., Carmeliet, J. (2007). On the error associated with the use of hourly data in wind-driven rain calculations on building facades. Atmospheric Environment, 41(11): 2335-2343, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.11.014.

[13] Lacy, R.E. (1977). Climate and Building in Britain. London: Her Majesty's Stationery Office.

[14] Henriques, F.M.A. (1992). Quantification of wind-driven rain. An experimental approach. A general review on driven rain and details of an experiment in Portugal to supplement existing research results in Norway, the UK and elsewhere. Building Research and Information, 20(5): 295-297, doi: http://dx.doi.org/10.1080/09613219208727227.

[15] Straube, J.F., Burnett, E.F.P. (2000). Simplified Prediction of Driving Rain Deposition. En Proceedings of International Building Physics Conference, Eindhoven, (pp. 375-382). Eindhoven.

[16] Lacy, R.E., Shellard, H.C. (1962). An index of driving rain. The Meteorological Magazine, 91(1080): 177-84.

[17] Sahal, N. (2006). Proposed approach for defining climate regions for Turkey based on annual driving rain index and heating degree-days for building envelope design. Building and Environment, 41(4): 520-526, doi: http://dx.doi. org/10.1016/j.buildenv.2005.07.004.

[18] Giarma, C., Aravantinos, D. (2011). Estimation of building components' exposure to moisture in Greece based on wind, rainfall and other climatic data. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 99(2-3): 91-102, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2010.12.001.

[19] 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.

[20] 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 for Testing and Materials.

[21] Welsh, R.E., Skinner, W.R., Morris, R.J. (1989). A climatology of driving rain pressure for Canada. Climate and Atmospheric Research Directorate Draft Report. Canada: Environment Canada, Atmospheric Environment Service.
[22] Bsi. (1992). BS 8104 Code of practice for assessing exposure of walls to wind-driven rain. British Standards Institution.
[23] Office of the Deputy Prime Minister. (2010). Approved Document C. Site preparation and resistance to contaminants and moisture. London: The Building Regulations

9. TABLA DE FIGURAS.

Figura 1. Imágenes representativas del problema de la acción combinada de la lluvia y viento.
Figura 2. Fundamentos de la lluvia batiente.
Figura 3. Esquema básico del instrumental necesario para registrar la lluvia batiente sobre una superficie vertical.
Figura 4. Imágenes representativas del número de estaciones en cada altura (Caso de cantidad de precipitaciones).
Figura 5. Imagen representativa del número de estaciones en todas alturas (Caso de cantidad de precipitaciones).
Figura 6. Imágenes representativas del número de estaciones en todas alturas.
Figura 7. Climogramas de ciudades del país que muestran la precipitación anual (mensual) o la variación de temperaturas para una localización geográfica.
Figura 8. Climogramas de ciudades del país que muestran la precipitación anual (mensual) o la variación de temperaturas para una localización geográfica.
Figura 9. Mapa de velocidades y presiones básicas del viento en Alemania.
Figura 10. Mapa de velocidades y presiones básicas del viento en Dinamarca.
Figura 11. Mapa topográfico de Alemania.
Figura 12. Mapa topográfico de Dinamarca.
Figura 13. Ficha resumen de todos los resultados obtenidos de este estudio.
Figura 14.Segunda parte de la ficha resumen de todos los resultados obtenidos de este estudio.
Figura 15.Ejemplo representativo de la distribución de Gumbell.
Figura 16. Mapa de exposición media anual a la lluvia batiente.
Figura 17. Mapa de exposición media anual de la presión eólica simultánea a la lluvia batiente.
Figura 18. Gráfica representativa de todos los índices de exposición a la penetración de la humedad.
Figura 19. Gráfica representativa de la correlación entre daDRI y la Pluv. Media.
Figura 20. Gráfica representativa de la correlación entre daDRI y aaDRI.
Figura 21. Gráfica representativa de la correlación entre dDRWP y aDRWP.
Figura 22. Gráfica representativa de la correlación entre dDRWP y Vel. Media del viento.
Figura 23. Gráfica representativa de la correlación entre daDRI y altitud (m).
Figura 24. Gráfica representativa de la correlación entre DRWP y altitud (m).