

ANEXO 5. INFORME DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

Modelización de emisiones — Applus Norcontrol, código CI-128474/01, edición 01, 27 de agosto de 2026



Firmado digitalmente por: 2026.09.
JOSE ANTONIO 04
CULLIA 12:42:27
DE LA MAZA +02'00'

MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

Estudio de dispersión de contaminantes derivados de escenarios de incendio en instalaciones de almacenamiento de energía eléctrica, enmarcados dentro de la actuación 4256934 PA-BATERÍAS.



MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

Estudio de dispersión de contaminantes derivados de escenarios de incendio en instalaciones de almacenamiento de energía eléctrica, enmarcados dentro de la actuación 4256934 PA-BATERÍAS.



Proyecto: Estudio de dispersión de contaminantes derivados de escenarios de incendio en instalaciones de almacenamiento de energía eléctrica, enmarcados dentro de la actuación 4256934 PA-BATERÍAS

Cliente: TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS AGRARIOS, S.A., S.M.E., M.P. (TRAGSATEC)

Código del documento: CI-128474/01

Edición: 01

Fecha del documento: 27 de agosto de 2026

Applus Norcontrol, S.L.U.

Parque Tecnológico de Asturias, parcela 33- 33420 Llanera (Asturias)

El contenido de esta comunicación, incluyendo los anexos, es para el uso de la persona, personas o la entidad o entidades a la que va dirigida y puede contener material confidencial. No se permite la retransmisión, difusión o cualquier otro uso basado en esta información a personas o entidades distintas del destinatario. Si usted ha recibido esta comunicación por error, le rogamos que por favor contacte con el remitente y destruya todas las copias de esta información.

Usted recibe esta comunicación porque figura en un fichero propiedad del grupo Applus+, puede ejercer sus derechos de acceso, rectificación, cancelación y oposición enviando a través de lopd@applus.com.

Applus+, garantiza que este trabajo se ha realizado dentro de lo exigido por nuestro Sistema de Calidad y Sostenibilidad, habiéndose cumplido las condiciones contractuales y la normativa legal.

En el marco de nuestro programa de mejora les agradecemos nos transmitan cualquier comentario que consideren oportuno, dirigiéndose al responsable que firma este escrito, o bien, al director de Calidad de Applus+, en la dirección: satisfaccion.cliente@applus.com

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página
1 CONTEXTO GENERAL	6
1.1 Antecedentes y justificación del estudio	6
1.2 Particularidades de las emisiones asociadas a un incendio en instalaciones BESS	6
1.3 Marco de referencia para la evaluación de las concentraciones	7
1.4 Necesidad de la modelización atmosférica	8
1.5 Justificación del estudio en el contexto de la ordenación territorial	9
1.6 Alcance e interpretación de los resultados	9
2 OBJETO	10
3 INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO	11
4 MODELO CONCEPTUAL SEGUIDO PARA EL DESARROLLO DEL ESTUDIO	13
4.1 Aspectos generales considerados para la definición del escenario de incendio	13
4.2 Información de la instalación	13
4.3 Información complementaria del análisis de seguridad del Bess	13
4.4 Focos de emisión, contaminantes y condiciones de emisión	14
4.4.1 Focos / fuentes de emisión	14
4.4.2 Contaminantes evaluados	15
4.4.3 Variables para el cálculo de emisiones	18
4.4.4 Establecimiento de las tasas de emisión	19
4.5 Modelo digital del terreno	20
4.6 Análisis meteorológico	21
4.6.1 Información meteorológica empleada	21
4.6.2 Análisis meteorológico año 2025	22
4.6.3 Análisis meteorológico día normal de dispersión	30
4.6.4 Análisis meteorológico peor día de dispersión	33
4.6.5 Análisis meteorológico mejor día de dispersión	37
5 DESCRIPCIÓN DEL MODELO	40
5.1 Modelo AERMOD	40
5.2 Variables meteorológicas de entrada del modelo AERMOD	42
6 ESCENARIOS DE MODELIZACIÓN	43
6.1 Definición de escenarios	43
6.2 Modelado de las fuentes de emisión y entorno	43
6.3 Resolución y definición del dominio	45
6.4 Resultados	48
6.4.1 Archivos de entrada AERMOD	48
6.4.2 Archivos de salida AERMOD	48
7 ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
7.1 Monóxido de carbono (CO)	49
7.2 Hidrógeno (H ₂)	54
7.3 Material particulado (PM ₁₀ y PM _{2,5})	58
7.4 Fluoruro de hidrógeno (HF)	62
8 VALIDACIÓN E INCERTIDUMBRE DEL MODELO	66
9 CONCLUSIONES	67
10 EQUIPO REDACTOR	71
11 ANEXOS	72
12 LISTA DE ABREVIATURAS	73
13 BIBLIOGRAFÍA	75

Lista de Ilustraciones

	Página
Ilustración 1. Vista general de localización	12
Ilustración 2. Fuente de área empleada para la simulación	15
Ilustración 3. Modelo digital del terreno	20
Ilustración 4. Punto central de la simulación meteorológica WRF	22
Ilustración 5. Climograma de Gausen	23
Ilustración 6. Temperatura promedio mensual	23
Ilustración 7. Perfil horario de temperatura	24
Ilustración 8. Precipitación acumulada mensual	24
Ilustración 9. Precipitaciones acumuladas horarias	25
Ilustración 10. Humedad relativa promedio mensual	25
Ilustración 11. Humedad relativa promedio horaria	26
Ilustración 12. Rosa de vientos año 2025	26
Ilustración 13. Distribución de la frecuencia de vientos del año 2025	27
Ilustración 14. Velocidad del viento promedio mensual	27
Ilustración 15. Velocidad del viento promedio horaria	28
Ilustración 16. Altura de mezcla promedio mensual	28
Ilustración 17. Altura de mezcla promedio horaria	29
Ilustración 18. Perfil horario de temperatura - Día normal de dispersión	31
Ilustración 19. Precipitaciones horarias - Día normal de dispersión	31
Ilustración 20. Altura de mezcla horaria - Día normal de dispersión	32
Ilustración 21. Rosa de vientos en día normal de dispersión	32
Ilustración 22. Distribución de la frecuencia de vientos en el día normal de dispersión	33
Ilustración 23. Velocidad del viento horaria - Día normal de dispersión	33
Ilustración 24. Perfil horario de temperatura - Peor día de dispersión	34
Ilustración 25. Precipitaciones horarias - Peor día de dispersión	34
Ilustración 26. Altura de mezcla horaria - Peor día de dispersión	35
Ilustración 27. Rosa de vientos en peor día de dispersión	36
Ilustración 28. Distribución de la frecuencia de vientos en el peor día de dispersión	36
Ilustración 29. Velocidad del viento - Peor día de dispersión	37
Ilustración 30. Perfil horario de temperatura - Mejor día de dispersión	37
Ilustración 31. Precipitaciones horarias - Peor día de dispersión	38
Ilustración 32. Altura de mezcla horaria - Mejor día de dispersión	38
Ilustración 33. Rosa de vientos en mejor día de dispersión	39
Ilustración 34. Distribución de frecuencia de vientos en el día de mejor dispersión	40
Ilustración 35. Velocidad del viento horaria - Mejor día de dispersión	40
Ilustración 36. Esquema del sistema de modelación AERMOD	41
Ilustración 37. Idealización de las fuentes	45
Ilustración 38. Mallas de receptores e idealización de las fuentes	46
Ilustración 39. Localización de los receptores sensibles evaluados	47
Ilustración 40. Isopleta CO 1 hora - Escenario día normal de dispersión	51
Ilustración 41. Isopleta CO 1 hora - Escenario mejor día de dispersión	52
Ilustración 42. Isopleta CO 1 hora - Escenario Peor día de dispersión	53
Ilustración 43. Isopleta H ₂ 1 hora - Escenario día normal de dispersión	55
Ilustración 44. Isopleta H ₂ 1 hora - Escenario mejor día de dispersión	56
Ilustración 45. Isopleta H ₂ 1 hora - Escenario Peor día de dispersión	57
Ilustración 46. Isopleta Material particulado 24 horas - Escenario día normal de dispersión	59
Ilustración 47. Isopleta Material particulado 24 horas - Escenario mejor día de dispersión	60
Ilustración 48. Isopleta material particulado 24 horas - Escenario Peor día de dispersión	61
Ilustración 49. Isopleta HF 1 hora - Escenario día normal de dispersión	63
Ilustración 50. Isopleta HF 1 hora - Escenario mejor día de dispersión	64
Ilustración 51. Isopleta HF 1 hora - Escenario peor día de dispersión	65

Lista de Tablas

Página

Tabla 1. Volumen de gases generados durante un thermal runaway por tipo de celda	13
Tabla 2. Composición media de los principales gases emitidos durante un thermal runaway según el tipo de celda	13
Tabla 3. Factores de emisión de fluoruro de hidrógeno (HF) y material particulado ($PM_{10}/PM_{2,5}$) en incendio de celdas tipo LFP.....	14
Tabla 4. Fuentes de área	14
Tabla 5. Valor límite del nivel AEGL-2 para el contaminante CO.....	16
Tabla 6. Valor del límite inferior de explosividad para el compuesto H_2	17
Tabla 7. Valores límite para el material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$	17
Tabla 8. Valores límite del nivel AEGL-1 para el contaminante HF	18
Tabla 9. Variables para cálculo de emisiones	18
Tabla 10. Tasa de emisión por fuentes de área (g/s)	19
Tabla 11. Tasa de emisión por fuentes de área ($g/s/m^2$).....	19
Tabla 12. Tasa de emisión por fuentes de área (kg/día).....	19
Tabla 13. Estabilidad atmosférica - Longitud Monin-Obukhov del modelo WRF.....	30
Tabla 14. Parámetros modelo AERMOD	42
Tabla 15. Idealización de las fuentes	44
Tabla 16. Parámetros de deposición gaseosa en el fluoruro de hidrogeno (HF)	44
Tabla 17. Resumen fuentes de área	45
Tabla 18. Resumen ejemplo con receptores sensibles evaluados	47
Tabla 19. Lista de abreviaturas.....	73

1 CONTEXTO GENERAL

1.1 Antecedentes y justificación del estudio

En los últimos años, el sistema eléctrico del Principado de Asturias se encuentra inmerso en un proceso de transformación asociado a la transición energética, a la progresiva incorporación de fuentes renovables y a la necesidad de reforzar las infraestructuras vinculadas a la generación, transporte, distribución y almacenamiento de energía eléctrica. En este contexto, se ha producido un incremento de las solicitudes para la implantación de Sistemas de Almacenamiento de Energía mediante Baterías (*Battery Energy Storage Systems*, BESS), especialmente en instalaciones de almacenamiento independientes o *stand-alone*, lo que ha puesto de manifiesto la necesidad de abordar su implantación desde una perspectiva territorial integrada.

Las instalaciones de almacenamiento de energía eléctrica son aquellas destinadas a diferir el uso final de electricidad a un momento posterior al de su generación o a realizar la conversión de energía eléctrica en una forma de energía que pueda almacenarse para su posterior reconversión en energía eléctrica. Estos sistemas constituyen, por tanto, un elemento emergente de la infraestructura energética y presentan características específicas en cuanto a ocupación del territorio, condiciones de implantación, relación con otras infraestructuras y posibles interacciones con los usos existentes en su entorno.

La necesidad de abordar esta cuestión desde una perspectiva territorial se ha traducido en la iniciativa del Gobierno del Principado de Asturias para la formulación y elaboración de unas Directrices Sectoriales de Ordenación del Territorio para las instalaciones de almacenamiento de energía eléctrica mediante baterías en suelo no urbanizable. El procedimiento fue iniciado formalmente mediante Acuerdo del Consejo de Gobierno de 25 de agosto de 2025, estableciendo como objeto la elaboración de un marco de ordenación específico para este tipo de instalaciones.

Las Directrices se plantean, por tanto, como un instrumento de planificación sectorial con incidencia territorial y ambiental, dirigido a establecer criterios que permitan compatibilizar el desarrollo de las infraestructuras de almacenamiento necesarias para la transición energética con la preservación del medio natural, el paisaje y el modelo territorial asturiano. El documento de avance establece, en particular, criterios de localización destinados a orientar la implantación de instalaciones BESS *stand-alone* de potencia superior a 3 MW en suelo no urbanizable.

En este contexto de planificación resulta necesario considerar no solamente los efectos asociados al funcionamiento ordinario de estas instalaciones, sino también aquellos que pudieran derivarse de situaciones accidentales susceptibles de producir consecuencias sobre el territorio y la población. Entre estos escenarios adquiere especial relevancia la eventual ocurrencia de un incendio en un sistema de almacenamiento mediante baterías y, específicamente, las posibles emisiones a la atmósfera generadas durante su desarrollo.

1.2 Particularidades de las emisiones asociadas a un incendio en instalaciones BESS

Debe señalarse, en primer lugar, que una instalación BESS no constituye, durante su funcionamiento ordinario, una fuente de emisiones atmosféricas de carácter continuo o sistemático comparable a las instalaciones industriales en las que existen procesos de combustión, transformación o tratamiento que generan emisiones atmosféricas de forma habitual. El almacenamiento electroquímico de energía no lleva asociado, en condiciones normales de funcionamiento, un proceso de combustión ni una emisión atmosférica significativa que determine por sí misma la calidad del aire del entorno.

La situación es sustancialmente diferente ante un escenario accidental de fallo térmico, incendio o propagación del incendio entre diferentes elementos del sistema. En estas circunstancias pueden producirse emisiones temporales de una mezcla compleja de gases, vapores y partículas procedentes tanto de la descomposición térmica de los materiales que constituyen las baterías como de la combustión de los distintos componentes de la instalación.

La naturaleza y magnitud de estas emisiones dependen de múltiples factores, entre ellos la tecnología y química de las baterías, el estado de carga, la cantidad de material afectado, la configuración de los módulos y contenedores, la evolución y duración del incendio, las condiciones de ventilación y las características de los sistemas de detección, control, refrigeración y extinción.

Esta variabilidad constituye una de las principales dificultades para la caracterización de las emisiones asociadas a un incendio de estas características. Aunque durante los últimos años se ha producido un incremento significativo del conocimiento científico sobre el comportamiento de las baterías sometidas a condiciones de fallo térmico e incendio, los resultados disponibles proceden de ensayos realizados sobre diferentes químicas, formatos y escalas, por lo que su extrapolación a instalaciones BESS de gran capacidad requiere la adopción de hipótesis y factores de emisión adecuados al escenario objeto de análisis.

En consecuencia, la caracterización de las emisiones de un incendio en una instalación BESS no puede abordarse como un problema equivalente al de una fuente atmosférica convencional. Frente a un foco industrial cuya localización, geometría, altura y condiciones de emisión pueden mantenerse relativamente estables durante el funcionamiento normal, un incendio constituye una fuente de emisión accidental, transitoria y espacialmente variable, cuya intensidad y composición pueden evolucionar a lo largo del episodio.

Esta circunstancia determina que la evaluación de sus posibles efectos sobre la población y el entorno deba plantearse desde una perspectiva diferente a la utilizada habitualmente para valorar la calidad del aire ambiental.

1.3 Marco de referencia para la evaluación de las concentraciones

La evaluación de las concentraciones atmosféricas obtenidas mediante la modelización se realiza, en primer lugar, tomando como referencia el marco normativo español en materia de calidad del aire. En particular, el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, establece los objetivos de calidad del aire aplicables a los contaminantes regulados y define, entre otros conceptos, los valores límite y los valores objetivo asociados a la protección de la salud humana y del medio ambiente.

Estos valores constituyen el marco reglamentario de referencia para la evaluación de la calidad del aire ambiente en España y se encuentran asociados a periodos de promedio y criterios de evaluación determinados para cada contaminante. En consecuencia, cuando los contaminantes considerados en el escenario accidental se encuentran regulados por la normativa española y existe un periodo de promedio compatible con la escala temporal de la modelización, los resultados se contrastan con los correspondientes valores establecidos en dicha normativa.

No obstante, el hecho de que un contaminante disponga de un valor regulatorio de calidad del aire no implica que dicho valor pueda interpretarse automáticamente como un umbral de seguridad para cualquier escenario accidental. Los valores límite, valores objetivo y demás parámetros establecidos en la normativa de calidad del aire responden a un marco de evaluación ambiental definido reglamentariamente, con periodos de promedio y criterios de cumplimiento específicos. Por ello, su aplicación a un episodio accidental debe realizarse atendiendo a la naturaleza y duración del escenario modelizado y evitando una interpretación desvinculada del contexto para el que fueron establecidos.

Esta consideración resulta especialmente relevante cuando el episodio analizado puede producir concentraciones elevadas durante periodos de tiempo inferiores a aquellos contemplados por la normativa de calidad del aire. En estos casos, la evaluación exclusivamente mediante los valores regulatorios puede no proporcionar una caracterización suficiente de la posible exposición aguda de la población.

Por este motivo, el estudio incorpora adicionalmente los *Acute Exposure Guideline Levels* (AEGl), desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), como criterio toxicológico complementario específicamente orientado a situaciones accidentales de liberación de

sustancias químicas a la atmósfera. La EPA señala que los AEGL están destinados a apoyar la planificación y respuesta frente a liberaciones accidentales y se establecen para periodos de exposición de 10 minutos, 30 minutos, 1 hora, 4 horas y 8 horas, diferenciando tres niveles de gravedad de los efectos sobre la salud.

Los AEGL permiten, de este modo, complementar la evaluación realizada conforme al marco español de calidad del aire con un criterio específicamente adaptado a la exposición aguda. Su utilización resulta particularmente pertinente para aquellos contaminantes y escenarios temporales en los que los periodos de promedio establecidos en la normativa de calidad del aire no permiten representar adecuadamente la naturaleza episódica y de corta duración de la exposición.

La utilización de los AEGL debe entenderse como la adopción de un criterio toxicológico internacional de referencia para la evaluación de escenarios accidentales, y no como la consideración de dichos valores como valores límite reglamentarios de calidad del aire aplicables en España. Su función dentro del estudio es complementar el marco normativo nacional allí donde las características temporales y toxicológicas del escenario accidental hacen necesario disponer de una referencia específica para exposición aguda.

1.4 Necesidad de la modelización atmosférica

A pesar de la existencia de información científica y técnica sobre incendios de baterías, persisten incertidumbres relevantes en la caracterización de un evento accidental a escala de una instalación BESS. La diversidad de tecnologías existentes, las diferentes químicas de las celdas, las configuraciones constructivas y la propia evolución del incendio hacen que no exista un único patrón de emisión que pueda considerarse representativo de todas las instalaciones.

Por otra parte, el impacto potencial de una emisión accidental no depende exclusivamente de la cantidad de contaminante liberada. La concentración que finalmente puede alcanzar un receptor depende de las condiciones meteorológicas existentes durante el episodio, de la topografía y orografía, de las características del foco y de las propiedades físicas y químicas de los contaminantes.

Entre las variables meteorológicas adquieren especial relevancia la velocidad y dirección del viento, la estabilidad atmosférica y la turbulencia. A ellas se añaden las características topográficas del emplazamiento y de su entorno, la geometría y extensión espacial del foco, su altura efectiva, la tasa y duración de la emisión y, en aquellos contaminantes para los que resulte relevante, los procesos de transformación, deposición o pérdida durante el transporte atmosférico.

Los modelos matemáticos de dispersión atmosférica permiten integrar este conjunto de variables para estimar la evolución espacial y temporal de las concentraciones de los contaminantes emitidos. Se trata de herramientas ampliamente utilizadas en la evaluación de emisiones y de sus efectos sobre la calidad del aire y que, adecuadamente parametrizadas, permiten trasladar una tasa de emisión definida en el foco a una estimación de las concentraciones potencialmente alcanzables en el entorno.

Su utilización en un escenario accidental requiere, no obstante, una consideración específica de las características de la fuente. Un incendio no constituye una fuente estacionaria convencional, sino un fenómeno cuya intensidad, extensión y composición pueden variar durante su evolución. Por ello, la definición del foco emisor y de su evolución temporal constituye uno de los elementos fundamentales del análisis y una de las principales fuentes de incertidumbre del resultado.

La modelización desarrollada en el presente estudio no pretende, por tanto, predecir de manera determinista el comportamiento de cualquier incendio que pudiera producirse en una instalación BESS. Su finalidad es establecer un escenario accidental de referencia, definido a partir de hipótesis técnicas explícitas, que permita estimar la magnitud y distribución espacial de las concentraciones atmosféricas potencialmente asociadas al evento.

1.5 Justificación del estudio en el contexto de la ordenación territorial

La realización de este análisis responde a la necesidad de incorporar al proceso de ordenación territorial una evaluación específica de las posibles consecuencias atmosféricas de un incendio accidental en instalaciones BESS.

Desde esta perspectiva, el interés del estudio no reside exclusivamente en determinar la concentración de contaminantes que podría producirse en las inmediaciones de una instalación concreta, sino en aportar una base técnica que permita valorar la relevancia territorial de este tipo de escenarios y su posible interacción con los usos existentes en el entorno.

La consideración de un escenario accidental permite, de este modo, complementar los restantes análisis de seguridad y de consecuencias físicas que puedan realizarse para estas instalaciones. Mientras que los análisis de riesgos y de seguridad pueden abordar cuestiones como la probabilidad de ocurrencia, la propagación del incendio, la radiación térmica, la sobrepresión o las distancias asociadas a determinados efectos físicos, la modelización atmosférica permite analizar específicamente la evolución de los contaminantes liberados y las concentraciones potencialmente alcanzables en los receptores situados en el entorno.

Esta información resulta particularmente relevante en el ámbito de la planificación territorial, donde la ubicación de las instalaciones puede determinar la distancia respecto de núcleos de población, viviendas aisladas, equipamientos, espacios naturales u otros receptores potencialmente sensibles. La caracterización espacial de las concentraciones permite incorporar esta dimensión al establecimiento de criterios de localización y contribuir a que la planificación considere no sólo las condiciones ordinarias de funcionamiento, sino también las posibles consecuencias de situaciones accidentales.

El estudio se plantea, por tanto, como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en el marco de las Directrices Sectoriales de Ordenación del Territorio para las instalaciones BESS en suelo no urbanizable del Principado de Asturias. Su finalidad es proporcionar una base técnica objetiva y reproducible que permita valorar, dentro del conjunto de factores ambientales, territoriales y de seguridad considerados por las Directrices, la posible afección atmosférica asociada a un escenario accidental de incendio.

1.6 Alcance e interpretación de los resultados

Los resultados obtenidos mediante la modelización deben interpretarse teniendo en cuenta la naturaleza hipotética del escenario analizado y las incertidumbres inherentes a la caracterización de un incendio en una instalación BESS. Las concentraciones calculadas no constituyen una predicción determinista de las concentraciones que necesariamente se producirían en caso de incendio, sino una estimación asociada a las hipótesis de emisión, evolución del foco y condiciones meteorológicas consideradas.

La interpretación se realiza atendiendo conjuntamente a la magnitud de las concentraciones obtenidas, su distribución espacial y temporal y su comparación con los distintos valores de referencia considerados en el estudio.

En primer lugar, para aquellos contaminantes regulados por la normativa española de calidad del aire, los resultados se contrastan con los correspondientes valores límite, valores objetivo u otros parámetros de calidad del aire que resulten aplicables, teniendo en consideración el periodo de promedio asociado a cada uno de ellos. Este análisis permite contextualizar las concentraciones modelizadas respecto del marco regulatorio vigente en España.

En segundo lugar, y de manera complementaria, las concentraciones se comparan con los correspondientes valores AEGL disponibles, considerando el periodo de exposición compatible con el escenario modelizado. Esta segunda evaluación permite caracterizar específicamente la posible exposición aguda asociada al episodio accidental, incorporando referencias toxicológicas desarrolladas para este tipo de situaciones.

La consideración conjunta de ambos marcos permite evitar que la evaluación quede limitada a una única escala temporal o a un único criterio de protección. La normativa de calidad del aire proporciona el marco reglamentario nacional para los contaminantes y periodos que regula, mientras que los AEGL aportan una referencia adicional para valorar la posible relevancia toxicológica de exposiciones agudas durante el episodio accidental.

Por tanto, la eventual superación de un valor de referencia no debe interpretarse de forma aislada ni como una determinación automática de la existencia de un riesgo inaceptable. La interpretación debe considerar el tipo de valor de referencia de que se trate, su periodo de promedio, la duración de la exposición modelizada, el contaminante considerado, las hipótesis de emisión y las incertidumbres asociadas al escenario.

Del mismo modo, la ausencia de superación de un determinado valor de referencia no implica que el episodio carezca de cualquier efecto ambiental o sanitario potencial, sino que, bajo las hipótesis y condiciones consideradas, las concentraciones estimadas se mantienen por debajo del nivel de comparación correspondiente.

Los resultados deben interpretarse, por tanto, como una caracterización cuantitativa y espacial de un escenario accidental de referencia, y no como una predicción determinista del comportamiento de cualquier incendio que pudiera producirse en una instalación BESS.

Esta aproximación permite transformar un fenómeno accidental de elevada variabilidad en un escenario técnicamente definido y susceptible de comparación mediante criterios homogéneos. De este modo, la modelización aporta información objetiva sobre la posible extensión espacial de las concentraciones y sobre su relación con los diferentes niveles de referencia empleados, proporcionando una base técnica adicional para la definición de criterios territoriales. La finalidad última del estudio no es sustituir los análisis de seguridad, protección contra incendios, autoprotección o planificación de emergencias que resulten exigibles para las instalaciones concretas, ni determinar por sí sola la aptitud de un emplazamiento específico.

En definitiva, la modelización realizada constituye una aproximación cuantitativa a un fenómeno que, por su naturaleza accidental, presenta una elevada variabilidad e incertidumbre. Su valor para la planificación territorial reside en permitir caracterizar, bajo hipótesis explícitas, tanto la posible afección respecto del marco regulatorio de calidad del aire vigente en España como la exposición aguda mediante criterios toxicológicos específicamente desarrollados para escenarios accidentales. La consideración conjunta de ambas perspectivas contribuye a proporcionar una base técnica más completa para valorar la posible exposición de la población y del medio ambiente y para establecer criterios de ordenación orientados a minimizar los efectos potenciales asociados a la implantación de instalaciones BESS.

2 OBJETO

El presente estudio tiene como finalidad aportar información técnica de carácter territorial que permita incorporar la posible afección atmosférica de un incendio accidental como uno de los elementos a considerar en la definición de criterios generales de implantación, a partir del estudio y determinación de la afección al entorno de un potencial evento de incendio en una instalación BESS tipo, localizada en suelo no urbanizable en la zona centro de Asturias, mediante una modelización de emisiones empleando el modelo AERMOD.

La información principal relacionada con la implantación y disposición de los contenedores de la instalación ha sido aportada por TRAGSATEC, partiendo de un caso real.

Los datos básicos para el establecimiento de contaminantes y tasas de emisión han procedido de un estudio específico encargado por TRAGSATEC en el marco del proyecto, así como del estudio bibliográfico y experiencia técnica previa.

3 INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO

Para la realización de un estudio de estas características se pueden emplear distintos enfoques y herramientas, como modelos gaussianos (modelos de estado estacionario), lagrangianos o modelos de puff (modelos no estacionarios) o incluso estudios basados únicamente en cálculos numéricos teóricos y/o análisis estadísticos. Por el tipo de evaluación requerida se ha optado por el empleo de un modelo de dispersión como herramienta avalada para el estudio del comportamiento de contaminantes en la atmósfera y, de entre los dos tipos de modelos, se ha seleccionado AERMOD, modelo matemático de dispersión de plumas de estado estacionario, desarrollado y recomendado por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.) y utilizado globalmente. Evalúa la concentración y deposición de contaminantes atmosféricos primarios provenientes de fuentes industriales, urbanas y rurales y es un estándar empleado para evaluar impactos a corto plazo y distancias cortas (< 50 km).

A través de la aplicación de modelos de dispersión atmosférica de tipo gaussiano, específicamente mediante el uso de las herramientas AERMOD y AERMET, se busca estimar las concentraciones máximas de contaminantes en el aire en el entorno de las instalaciones objeto de estudio, bajo condiciones meteorológicas desfavorables tanto para la dispersión como para el transporte de contaminantes.

El estudio permitirá identificar los niveles de exposición en receptores poblacionales que se encuentren ubicados dentro de un radio de 5 km desde la fuente, adicional se tuvo en cuenta 3 mallas cartesianas, las cuales están descritas en el capítulo 6.

Como datos meteorológicos, necesarios para la ejecución del modelo, se empleó la serie horaria de condiciones meteorológicas a partir de datos de la simulación meteorológica de mesoescala WRF (*Weather Research and Forecasting*) del año 2025.

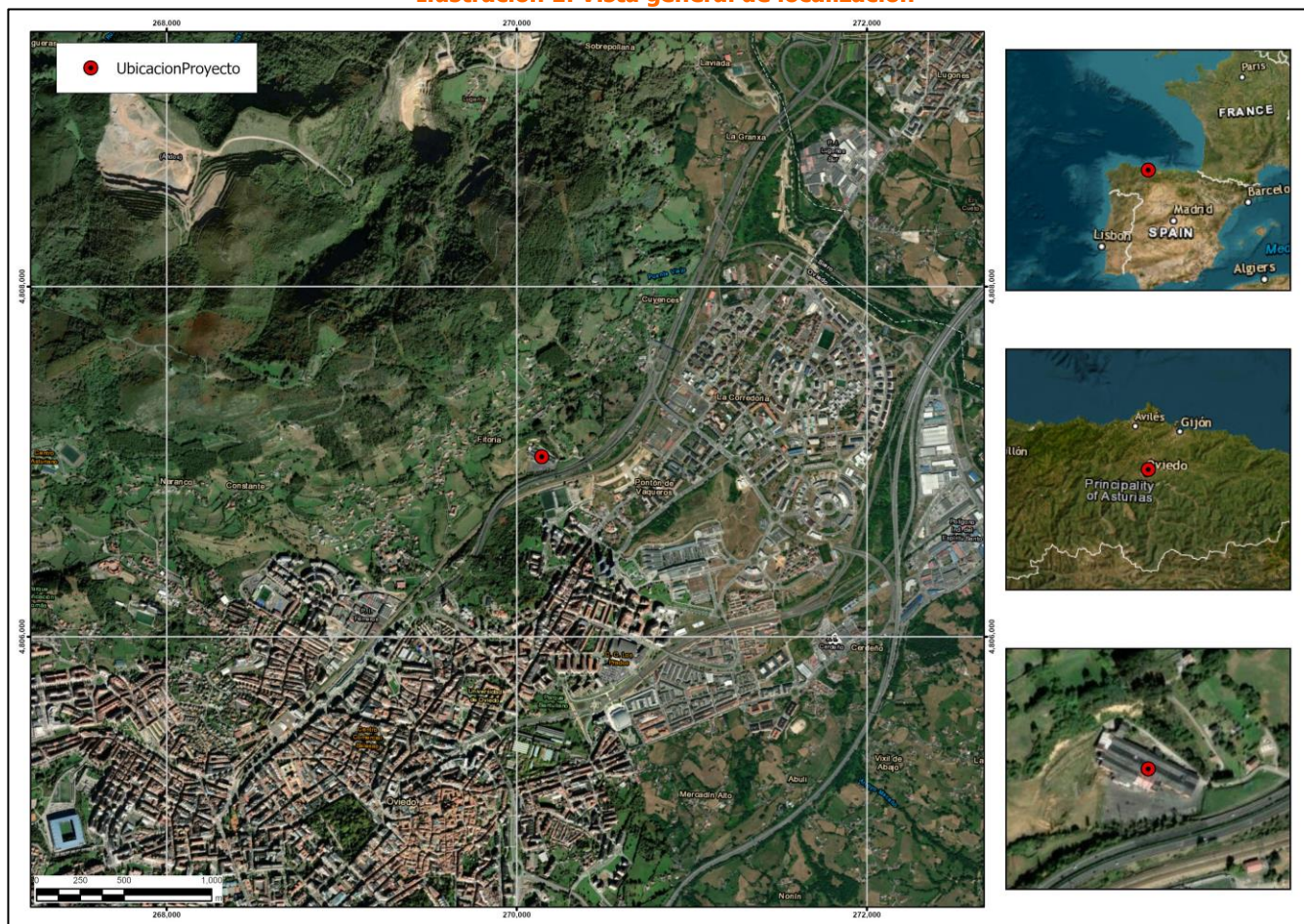
Para la evaluación de los resultados, las concentraciones de material particulado se compararon con los valores establecidos en el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. En el caso del monóxido de carbono (CO) y el fluoruro de hidrógeno (HF), se utilizaron como referencia los límites de exposición definidos por los Acute Exposure Guideline Levels (AEGL) y desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) en situaciones de emergencia o accidentes con materiales peligrosos. Específicamente, para el HF se adoptó el nivel AEGL-1, correspondiente a efectos leves, transitorios o de incomodidad, mientras que para el CO se consideró el nivel AEGL-2 (debido a que este contaminante no cuenta con un umbral AEGL-1 definido), el cual se encuentra asociado a efectos adversos graves o irreversibles, así como a la potencial disminución de la capacidad de una persona para adoptar medidas de autoprotección.

Por su parte, la concentración de hidrógeno molecular (H₂) se comparó con su límite inferior de explosividad (LEL, por sus siglas en inglés), dado que este compuesto no se clasifica como un contaminante atmosférico de interés toxicológico para la salud humana. Sin embargo, el H₂ sí representa un riesgo significativo de inflamabilidad y explosión al mezclarse con el aire ambiente, por lo que la evaluación se orientó a verificar que los niveles estimados no alcancen las concentraciones mínimas requeridas para la ignición del gas.

En cuanto al emplazamiento tipo considerado se ha tomado como referencia un proyecto tramitado en la zona central de Asturias, en concreto en el concejo de Oviedo. Con un enfoque conservador, se ha considerado el incendio de un contenedor completo para la parametrización del escenario.

Las instalaciones proyectadas se emplazarán en el término municipal de Oviedo, perteneciente a la comunidad autónoma del Principado de Asturias tal como se aprecia en la Ilustración 1.

Ilustración 1. Vista general de localización



Fuente: Elaboración propia Applus+ (Estudio actual) con información de Tragsatec

4 MODELO CONCEPTUAL SEGUIDO PARA EL DESARROLLO DEL ESTUDIO

4.1 Aspectos generales considerados para la definición del escenario de incendio

Con el fin de situarse en una posición conservadora desde el punto de vista de la protección, se ha planteado un escenario accidental en el que se produce el incendio de un contenedor completo, seleccionándose aquel cuya posición es la más próxima a un receptor sensible.

La simulación se ha desarrollado considerando tres (3) escenarios. El primero corresponde a la dispersión de contaminantes durante un día con condiciones meteorológicas normales asociado al evento de incendio, el segundo escenario evalúa la dispersión bajo condiciones meteorológicas más desfavorables para la dispersión de contaminantes y el tercero bajo condiciones meteorológicas más favorables para su dispersión.

A la hora de establecer los datos básicos del evento (tiempos de duración, principales contaminantes, volumen, tasas de emisión, etc.) se partió del estudio denominado "Análisis de seguridad en los sistemas de almacenamiento basados en baterías de litio-ion" (Batiq Asesoría Tecnológica, 2026) incluido en el Anexo 1, de un análisis bibliográfico adicional de estudios de incendios y de la información de ensayos realizados por distintos fabricantes a los que se ha podido acceder.

4.2 Información de la instalación

A la hora de plantear el escenario se ha considerado la información de un modelo comercial de contenedor. El sistema de baterías consta de cuatro bastidores conectados en paralelo. Cada bastidor contiene ocho (8) módulos de batería y cada módulo consta de 104 celdas, lo que suma un total de 3.328 celdas en el sistema.

4.3 Información complementaria del análisis de seguridad del Bess

El estudio denominado "Análisis de seguridad en los sistemas de almacenamiento basados en baterías de litio-ion" (Batiq Asesoría Tecnológica, 2026) incluido en el Anexo 1 de este informe, analiza los factores de riesgo asociados a los eventos de thermal runaway. Entre ellos, se destaca la caracterización de los gases generados en función del tipo de celda que compone el contenedor de baterías, información respaldada por diversas bases de datos de ensayos de laboratorio.

En primer lugar, se registra el siguiente promedio de gases generados a partir del tipo de celda.

Tabla 1. Volumen de gases generados durante un thermal runaway por tipo de celda

Tipo de celda	Volumen de gas (L/kWh)
Batería iones de sodio (SIB)	600
Batería níquel-cobalto-aluminio (NCA)	595
Batería níquel-manganeso-cobalto (NMC)	493
Batería óxido de titanio y litio (LTO)	321
Batería litio-ferrofosfato (LFP)	219

Fuente: *Análisis de seguridad BESS* (Batiq Asesoría Tecnológica, 2026)

De acuerdo con la tabla anterior, se observa que la celda de tipo LFP genera la menor cantidad de gas, con una tasa de 219 L/kWh, siendo esta la tecnología que integra el contenedor de baterías de 6 MWh.

En segunda instancia, el estudio también detalla la composición promedio de los gases generados por tipo de celda a partir de diferentes investigaciones científicas, presentando lo siguiente.

Tabla 2. Composición media de los principales gases emitidos durante un thermal runaway según el tipo de celda

Tipo de celda	Compuesto				
	H ₂	CO	CO ₂	THC	Otros
SIB	29%	20%	33%	15%	2%
NCA	28%	28%	32%	9%	3%

Tipo de celda	Compuesto				
	H ₂	CO	CO ₂	THC	Otros
NMC	19%	28%	37%	13%	3%
LTO	15%	10%	68%	2%	5%
LFP	44%	11%	26%	13%	7%

Fuente: Análisis de seguridad BESS (Batiq Asesoría Tecnológica, 2026)

Expuesto lo anterior, la tecnología de celdas LFP presenta un perfil de desgasificación caracterizado por un elevado potencial de inflamabilidad, registrando la concentración promedio de hidrógeno (H₂) más alta de todas las químicas evaluadas con un 44%, superando holgadamente a SIB (29%), NCA (28%), NMC (19%) y LTO (15%). Si bien la emisión de monóxido de carbono (CO) en LFP es de un 11% - sustancialmente menor que en alternativas como NMC y NCA (ambas con 28%) o SIB (20%) -, lo que reduce en comparación el impacto de toxicidad aguda por CO en el entorno inmediato, la baja presencia de diluyente inerte (CO₂ con solo un 26%) junto a un 13% de hidrocarburos totales (THC) consolida un efluente gaseoso altamente reactivo.

En tercer lugar, si bien en la tabla anterior no se registra la caracterización del fluoruro de hidrógeno (HF) ni del material particulado (asumiendo la misma relación PM₁₀/PM_{2,5}), para el presente estudio se consideró su emisión en la mezcla gaseosa. Dicha inclusión se fundamenta en el documento Análisis de seguridad BESS (Batiq Asesoría Tecnológica, 2026), en el cual se reporta su presencia a partir de la revisión de diversas investigaciones científicas en celdas de tipo LFP. Las características de emisión de ambos contaminantes se detallan a continuación:

Tabla 3. Factores de emisión de fluoruro de hidrógeno (HF) y material particulado (PM₁₀/PM_{2,5}) en incendio de celdas tipo LFP

Tipo de celda	Sustancia	Factor de emisión	Unidad
LFP	HF	20 a 200	mg/Wh de energía
	PM ₁₀ /PM _{2,5}	0,0047	g/kg de celda incendiada

Fuente: (Longfield Solar Energy Farm Ltd, 2022) y (C. Gaya, 2025)

A partir de la Tabla 3, se observa la definición de los parámetros de emisión aplicables a la combustión accidental de celdas tipo LFP. La tasa de generación de HF se cuantifica entre 20 y 200 mg/Wh de energía (Farm, 2022), mientras que la emisión de material particulado (PM₁₀/PM_{2,5}) se determina en 0,0047 g/kg de celda consumida (C. Gaya, 2025). La adopción de estos valores permite incorporar la contribución de ambos contaminantes al inventario de emisiones del proyecto, garantizando un enfoque conservador respaldado por la literatura técnica especializada.

4.4 Focos de emisión, contaminantes y condiciones de emisión

4.4.1 Focos / fuentes de emisión

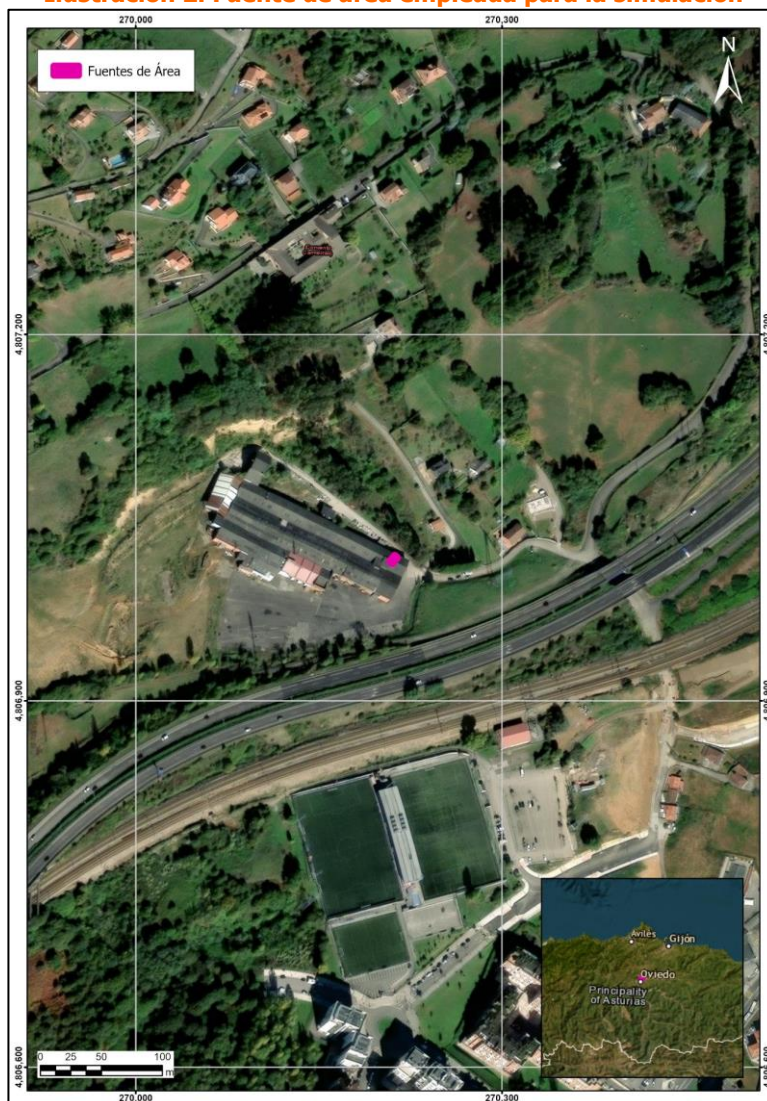
Considerando que las fuentes generadoras de contaminantes a la atmósfera se clasifican comúnmente en puntuales, de área y lineales (estas últimas asociadas al tráfico vehicular), para este estudio solo se identificó una fuente, la cual fue modelada como una fuente de área. Esta simplificación se definió en función de la distancia entre el contenedor de baterías y el receptor poblacional más cercano, tal como se detalla en la Tabla 4 y la Ilustración 2.

Tabla 4. Fuentes de área

ID Área	Nombre	Área (m ²)
CIB	Contenedor de batería incendiado	15

Fuente: Applus+ (Estudio actual) con información de Tragsatec

Ilustración 2. Fuente de área empleada para la simulación



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

Para el caso objeto de estudio, y tal y como se describe más adelante (sección 6.2), se ha considerado como área de emisión toda la superficie ocupada por el contenedor seleccionado, con el fin de buscar la hipótesis más desfavorable.

4.4.2 Contaminantes evaluados

A continuación, se presentan los contaminantes evaluados ante un posible incendio de un contenedor de baterías, así como los umbrales de referencia utilizados para analizar sus resultados.

Al no existir una normativa española que regule por completo estas situaciones de emergencia puntuales y de corta duración, se seleccionó como complemento la normativa de carácter internacional aplicable. Esta regulación ha sido desarrollada por organismos de reconocido prestigio, como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA) - entidad que colabora activamente con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) - y el Departamento de Energía de los Estados Unidos (U.S. DOE).

Bajo este marco, la evaluación de los resultados obtenidos del modelo de dispersión se estructuró de la siguiente manera:

- **Monóxido de carbono (CO) y fluoruro de hidrógeno (HF):** Se emplearon los niveles AEGL (*Acute Exposure Guideline Levels*), desarrollados por la U.S. EPA para exposiciones agudas.
- **Material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}):** Se comparó con los límites del Real Decreto 102/2011. Si bien se reconoce que estos corresponden a criterios de calidad del aire ambiente y no a límites específicos para eventos accidentales, su inclusión proporciona una referencia normativa de apoyo para identificar posibles afectaciones sobre la calidad del aire.
- **Hidrógeno molecular (H₂):** La concentración de la sustancia se evaluó frente a su límite inferior de explosividad (LEL), dado que este compuesto no representa un riesgo toxicológico significativo para la salud humana, pero sí constituye un factor de riesgo físico relevante debido a su alta inflamabilidad en el ambiente.

4.4.2.1 Monóxido de carbono (CO)

La selección de contaminantes a modelizar, así como la determinación de sus tasas de emisión, se ha realizado partiendo de la caracterización de los gases generados en función del tipo de celda que compone el contenedor de baterías. De entre los contaminantes gaseosos identificados se han seleccionado aquellos que, presentándose en porcentajes destacables, pueden presentar un riesgo directo desde el punto de vista de la toxicidad. Así, a pesar de su alto porcentaje, se han descartado contaminantes como el dióxido de carbono (CO₂).

Partiendo de este aspecto, el siguiente paso fue el estudio de la normativa aplicable. Para ello, se evaluaron los límites permisibles AEGL, *Acute Exposure Guideline Levels* (Niveles Guía de Exposición Aguda).

En el caso del monóxido de carbono (CO), se consideró el nivel de severidad AEGL-2 correspondiente a efectos serios, irreversibles o que impiden escapar del lugar de exposición, debido a que este contaminante no cuenta con valores de referencia establecidos para el nivel AEGL-1, el cual corresponde a efectos leves, transitorios o de incomodidad. A continuación, se presentan los límites máximos.

Tabla 5. Valor límite del nivel AEGL-2 para el contaminante CO

Contaminante	Nivel de severidad	Valor límite (ppm)	Valor límite (mg/m ³)*	Valor límite (µg / m ³)	Tiempo de exposición
Monóxido de carbono (CO)	AEGL-2	83	95,04	95.035,00	Horario

*1 ppm= 1,145 mg/m³

Fuente: Niveles de referencia para la exposición aguda a sustancias químicas presentes en el aire (United States Environmental Protection Agency (EPA), s.f.)

4.4.2.2 Hidrógeno (H₂)

Dado que el H₂ es un compuesto de alta inflamabilidad capaz de desencadenar una explosión en el aire ambiente y que, además, representa la mayor proporción en la composición de los gases emitidos durante un thermal runaway para celdas tipo LFP (tal como se aprecia en la Tabla 2), resulta imprescindible desarrollar su correspondiente evaluación de riesgo.

Para ello, la evaluación se centra en el Límite Inferior de Explosividad (LEL, por sus siglas en inglés), parámetro que determina la concentración mínima de gas o vapor en el aire requerida para que ocurra una deflagración ante la presencia de una fuente de ignición. De igual manera, es preciso aclarar que para este compuesto no se aplican los Criterios de Acción Protectora para Sustancias Químicas (PAC, por sus siglas en inglés) empleados habitualmente para la planificación de respuestas a emergencias por toxicidad, dado que la concentración límite del LEL se alcanza a niveles sustancialmente inferiores a los umbrales definidos por la escala PAC, constituyendo así el criterio de control más restrictivo y conservador.

Por lo anterior, la siguiente tabla presenta el nivel LEL a considerar en la evaluación del H₂.

Tabla 6. Valor del límite inferior de explosividad para el compuesto H₂

Compuesto	Nivel de severidad	Valor límite (ppm)	Valor límite (mg/m ³)*	Valor límite (µg/m ³) *	Tiempo de exposición
Hidrógeno molecular	LEL	40.000	3.298	3.298.000	Horario

*1 ppm $\approx$ 0,0825 mg/m³ bajo el estándar US EPA de 25 °C de temperatura y 1 atm de presión

Fuente: (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2026)

4.4.2.3 Material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5})

En el Análisis de seguridad del BESS (Batiq Asesoría Tecnológica, 2026), se menciona que existen referencias bibliográficas de eventos de estas características ocurridos en los que se evidenció la emisión de **partículas**, contaminante que además tiene un impacto sobre la salud reconocido y con regulación normativa específica en materia de calidad del aire.

A la hora de analizar su impacto se ha tomado el Real Decreto 102/2011, en particular el valor límite diario para la protección de la salud al tratarse, como ya se ha indicado, de un evento puntual (no de una emisión sistemática).

Tabla 7. Valores límite para el material particulado PM₁₀ y PM_{2,5}

	Valor límite (µg/m ³)	Periodo de promedio
Material particulado con diámetro aerodinámico menor a 10 µm (PM₁₀)		
Valor límite diario	50 µg/m ³ No podrán superarse en más de 35 ocasiones por año civil.	24 horas
Material particulado con diámetro aerodinámico menor a 25 µm (PM_{2,5})*		
Umbral de activación	25 µg/m ³	Promedio 24 h o Promedio móvil 24 h

*El Real Decreto 102 del 2011 no establece un valor límite diario para PM_{2,5}, se utilizará como valor de referencia el umbral de activación.

Fuente: R.D. 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire (Ministerio de la Presidencia, 2011)

Con la publicación del Real Decreto 34/2023, de 24 de enero, por el que se modifican el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire; el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación, aprobado mediante el Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre; y el Real Decreto 208/2022, de 22 de marzo, sobre las garantías financieras en materia de residuos, se establece un marco orientado a la gestión de episodios de contaminación por parte de las administraciones, al introducir formalmente umbrales de activación, información y alerta para contaminantes tales como PM₁₀, PM_{2,5} u ozono y reforzar las obligaciones de actuación, comunicación y planificación a corto plazo. El RD 34/2023 no introduce modificaciones en los valores límite para PM₁₀ y PM_{2,5} sino que adapta el RD 102/2011 al Plan Marco de Acción a corto plazo en caso de episodios de alta contaminación, aprobado por la Conferencia Sectorial de Medio Ambiente en 2021.

4.4.2.4 Fluoruro de hidrógeno (HF)

Se ha realizado una búsqueda bibliográfica de la emisión de **fluoruro de hidrógeno** (HF) en escenarios de estas características por la preocupación social manifestada, y en aras de reforzar la prevención y reducción del impacto del proyecto en todo tipo de situaciones.

A la hora de analizar los resultados se han considerado los límites permisibles establecidos por los AEGL (Acute Exposure Guideline Levels), tomando como referencia el nivel de severidad AEGL-1 y AEGL-2. El AEGL-1 corresponde a efectos leves, transitorios o de incomodidad. Por su parte, el nivel AEGL-2 corresponde a efectos irreversibles, graves o incapacidad de escape.

Tabla 8. Valores límite del nivel AEGL-1 para el contaminante HF

Contaminante	Nivel de severidad	Valor límite (ppm)	Valor límite (mg/m³)*	Valor límite (µg/m³) *	Tiempo de exposición
Fluoruro de Hidrógeno	AEGL-1	1	0,82	820	Horario
	AEGL-2	24	19,68	19.680	

*1 ppm=0,82 mg/m³

Fuente: Niveles de referencia para la exposición aguda a sustancias químicas presentes en el aire (United States Environmental Protection Agency)

4.4.3 Variables para el cálculo de emisiones

En esta sección se presentan los datos e información relevante utilizada en la estimación de emisiones de los contaminantes modelados, asociados a un posible incendio en un contenedor de batería.

En línea con el enfoque general del estudio, que pretende realizar el análisis con un carácter conservador, se han contemplado las premisas siguientes relacionadas con el escenario de incendio teórico evaluado:

- No hay información bibliográfica del análisis de escenarios de incendio que nos permitan determinar un volumen de gas emitido por lo que se ha optado por recurrir a información de los ensayos realizados por fabricantes.
- Con el fin de garantizar que no se infravalora la cantidad de gas emitido, se ha tomado la referencia de la emisión de los ensayos como la procedente de una única celda incendiada, de manera que, para conformar el escenario de incendio de un contenedor completo, **el volumen de gas liberado se ha multiplicado por el total de celdas del contenedor (3.328)**. Este supuesto está sobre estimando el volumen de gas emitido ya que, en su ensayo, los fabricantes no recogen únicamente los litros de gas de cada celda incendiada del módulo incendiado sino de celdas y módulos adyacentes y otros elementos del contenedor que se incendian (y que en el escenario hipotético modelizado se van a volver a contabilizar como aporte independiente). Sin embargo, al tratarse de un supuesto tipo también se podrá estar considerando la posibilidad de que algunos contenedores tengan otros elementos adicionales que en el incendio puedan verse afectados.
- Se planteó una duración de la combustión de 4 horas, equivalentes a 14.400 segundos**. Si bien hay resultados de pruebas y eventos en los que se observa una extensión cercana a las 12 horas desde el inicio del fuego en una sola celda hasta su propagación a todo el contenedor se optó por modelar la liberación en un lapso de 4 horas. Esta consideración responde a la necesidad de absorber la incertidumbre en la tasa de emisión y la naturaleza impredecible del evento, obteniendo así una concentración de gases y una duración representativas del peor escenario creíble (Longfield Solar Energy Farm Ltd, 2022).
- Al no contar con curvas disociadas de concentración de gases a lo largo del evento, ni otra información que permita realizar una distribución en el tiempo de los principales contaminantes gaseosos se asumió, que **la emisión de cada uno de los contaminantes ocurre de manera constante de todas las celdas y elementos incendiados**. Este supuesto representa un escenario conservador, debido a que considera una liberación continua de contaminantes sin contemplar la implementación de medidas de mitigación, sistemas de supresión, acciones de respuesta a emergencias o cualquier otro mecanismo de control que pudiera reducir las emisiones reales durante el evento.

En la tabla siguiente se expone de forma resumida las principales variables consideradas para el cálculo de las emisiones a emplear en el estudio.

Tabla 9. Variables para cálculo de emisiones

Variable	Valor
Cantidad de celdas	3.328
Capacidad energética de una celda (Ah)	565
Voltaje de una celda (V)	3,2
Energía de una celda (Wh)	1.808
Peso de la celda (g)	9.808

Variable	Valor
Peso total de las celdas (kg)	32.641
Energía nominal de un contenedor de baterías (MWh)	6,02
Volumen del gas liberado por celda (L)	395,95
Volumen del gas liberado por las celdas totales (L)	1.317.728,26
% de H ₂ en el gas	44
% de CO en el gas	11
Peso molecular H ₂ (g/mol)	2,02
Peso molecular CO (g/mol)	28,01
Densidad del H ₂ (g/L)	0,12*
Densidad del CO (g/L)	1,70*
Temperatura media del incendio (°C)	1.200
Tiempo de incendio (s)	14.400
Presión máxima (psig)	92,99
Presión absoluta (atm)	7,33
Factor de emisión material particulado (g/kg)	0,0047
Factor de emisión de Fluoruro de Hidrogeno (mg/Wh)	40

*Bajo las condiciones de temperatura y presión del incendio

Fuente: Applus+ (estudio actual) con información de (Batiq Asesoría Tecnológica, 2026), (C. Gaya, 2025) y (Longfield Solar Energy Farm Ltd, 2022)

Para estimar la emisión de HF, se adoptó un factor de 40 mg/Wh, valor que se ubica dentro del rango de 20 a 200 mg/Wh reportado en la literatura. Dicho parámetro se fundamenta en ensayos destructivos realizados bajo el protocolo UL9540A sobre celdas de tecnología LFP (Lithium Iron Phosphate), cuyos resultados evidenciaron una generación de HF del orden de 40 mg/Wh durante condiciones de thermal runaway (Longfield Solar Energy Farm Ltd, 2022). Asimismo, el Análisis de Seguridad del BESS (Batiq Asesoría Tecnológica, 2026) determina que la emisión de este compuesto presenta un orden de magnitud similar al del CO.

4.4.4 Establecimiento de las tasas de emisión

En este apartado se expone las tasas de emisión resultantes para los contaminantes a analizar, considerando la fuente de área identificada y las distintas consideraciones ya expuestas. En el Anexo 2 “Estimación de emisiones de contaminantes” se muestra con más detalle la información y cálculos realizados para su determinación.

Tabla 10. Tasa de emisión por fuentes de área (g/s)

ID Fuente	CO (g/s)	H ₂ (g/s)	HF (g/s)	MP (g/s)
CBI	0,95	0,27	0,93	0,0006

Fuente: Applus+ (estudio actual) con información de Batiq Asesoría Tecnológica (Batiq Asesoría Tecnológica, 2026)

Tabla 11. Tasa de emisión por fuentes de área (g/s/m²)

ID Fuente	CO (g/s/m²)	H ₂ (g/s/m²)	HF (g/s/m²)	MP (g/s/m²)
CBI	0,063	0,018	0,062	0,0000395

Fuente: Applus+ (estudio actual) con información de Batiq Asesoría Tecnológica (Batiq Asesoría Tecnológica, 2026)

Tabla 12. Tasa de emisión por fuentes de área (kg/día)

ID Fuente	CO (kg/día)	H ₂ (kg/día)	HF (kg/día)	MP (kg/día)
CBI	81,99	23,65	80,23	0,05

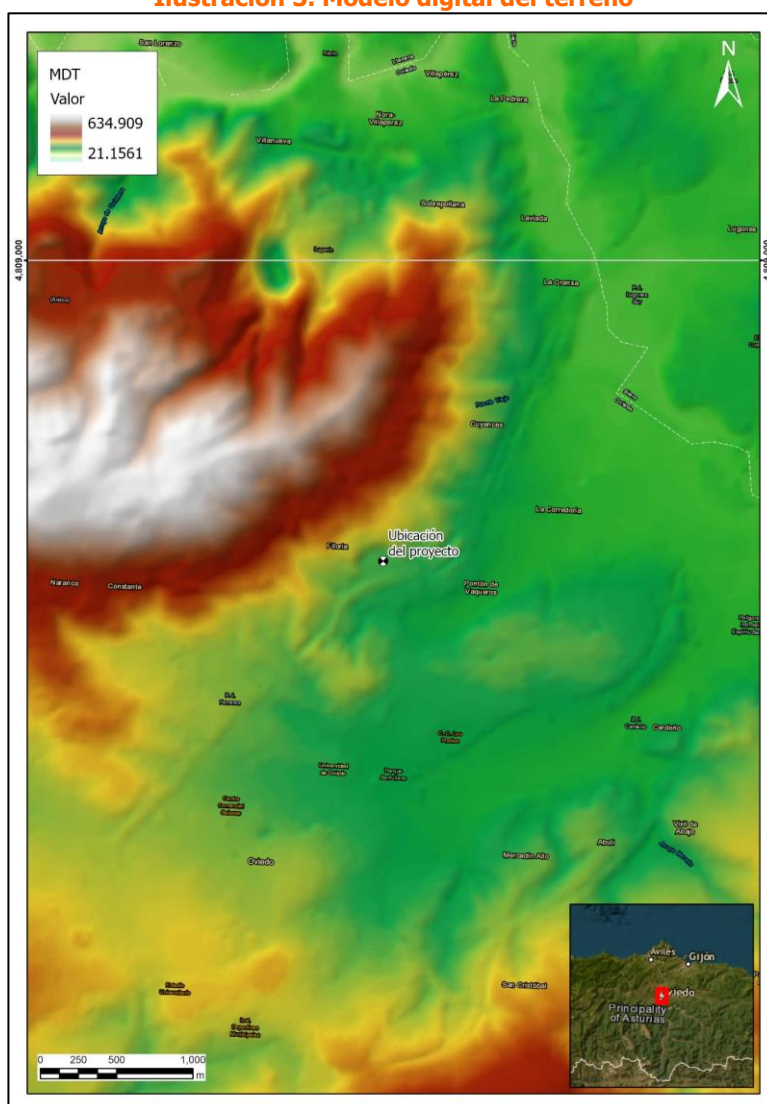
Fuente: Applus+ (estudio actual) con información de Batiq Asesoría Tecnológica (Batiq Asesoría Tecnológica, 2026)

La Tabla 12 indica que en el evento donde llegara a suceder un incendio en un contenedor de almacenamiento de baterías en las condiciones de incendio más extremas y con una duración de 4 horas, los aportes al ambiente serían 81,99 kg CO/día, 23,65 kg H₂/día, 80,23 kg HF/día y 0,05 kg MP/día.

4.5 Modelo digital del terreno

En el modelo de dispersión de contaminantes objeto de estudio, se tuvo en cuenta el relieve de la zona y las elevaciones tanto para los receptores sensibles como para la fuente simulada. Para el área del proyecto, se consideró la topografía con una resolución de 12,5 metros x 12,5 metros obtenida del satélite ALOS a través del sensor PALSAR de la Agencia Espacial Japonesa (JAXA), cuyos datos se encuentran en el aplicativo Earthdata de la NASA en el portal de la Universidad de ALASKA (JAXA/METI ALOS PALSAR).

Ilustración 3. Modelo digital del terreno



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual) con información de (JAXA/METI ALOS PALSAR)

4.6 Análisis meteorológico

4.6.1 Información meteorológica empleada

Para el análisis de dispersión de emisiones se utilizó el modelo de simulación de última generación WRF (Weather Research and Forecasting). La resolución temporal de los parámetros evaluados se encuentra a 3 km. Toda la información empleada en este capítulo corresponde a datos meteorológicos 24 horas del año 2025.

Se debe tener presente que la información meteorológica que se muestra en esta sección difiere de la meteorología local. La meteorología WRF corresponde a un modelamiento de datos que pueden llegar a ser de uno o más años, mientras la meteorología local comprende datos puntuales de superficie con intervalos de tiempo más cortos. AERMOD requiere de datos horarios de las variables meteorológicas que no son posibles medir con equipos localizados en superficies, mientras que, la meteorología WRF permite tener este amplio rango de datos.

Los datos fueron procesados en las tres etapas de AERMET. Los archivos entregados son "TRAGSA_2025.sfc" y "TRAGSA_2025.pfl", generados a partir de los archivos "TRAGSA_2025.sam" y "TRAGSA_2025.ua".

El Anexo 3 "*Validación de datos meteorológicos*", presenta la comparación entre los datos generados por el modelo WRF y los obtenidos de la estación Oviedo de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), la cual dispone de datos meteorológicos del año 2025 a una resolución diaria.

Por su parte, el Anexo 4 "*Archivos de modelación*", recopila toda la información utilizada en la simulación, incluyendo los datos meteorológicos del WRF y la topografía empleada en las modelaciones.

La información meteorológica sectorial utilizada contempla una resolución horizontal de 3 km x 3 km y una extensión geográfica de 461 x 393 km² desde su punto central. Su ubicación gráfica se observa en la Ilustración 4.

Ilustración 4. Punto central de la simulación meteorológica WRF



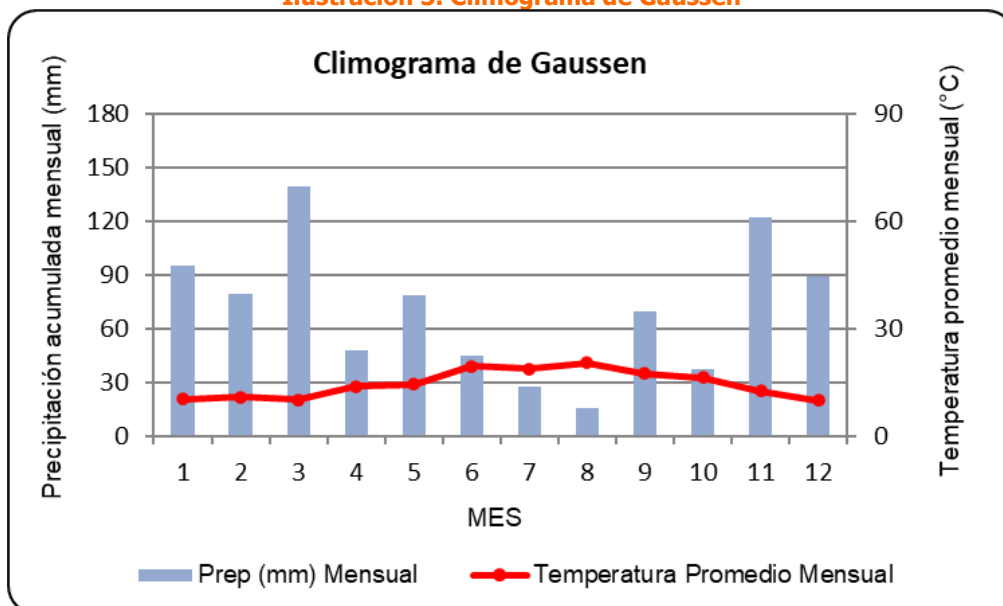
Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

Partiendo de esta información se procedió al análisis detallado que permita identificar y caracterizar las 3 condiciones a emplear en los escenarios modelizados.

4.6.2 Análisis meteorológico año 2025

Un primer elemento que permite realizar una valoración de la climatología de un lugar es el climograma (ver la Ilustración 5), que permite determinar los períodos que corresponden a meses secos o a meses húmedos. El climograma relaciona la precipitación mensual y la temperatura promedio mensual; se considera un mes como seco si la precipitación es inferior a dos veces la temperatura promedio. De acuerdo con lo anterior, en el año 2025 los meses de julio y agosto fueron meses secos, en línea con la información que se puede obtener analizando series meteorológicas de períodos anteriores.

Ilustración 5. Climograma de Gausson

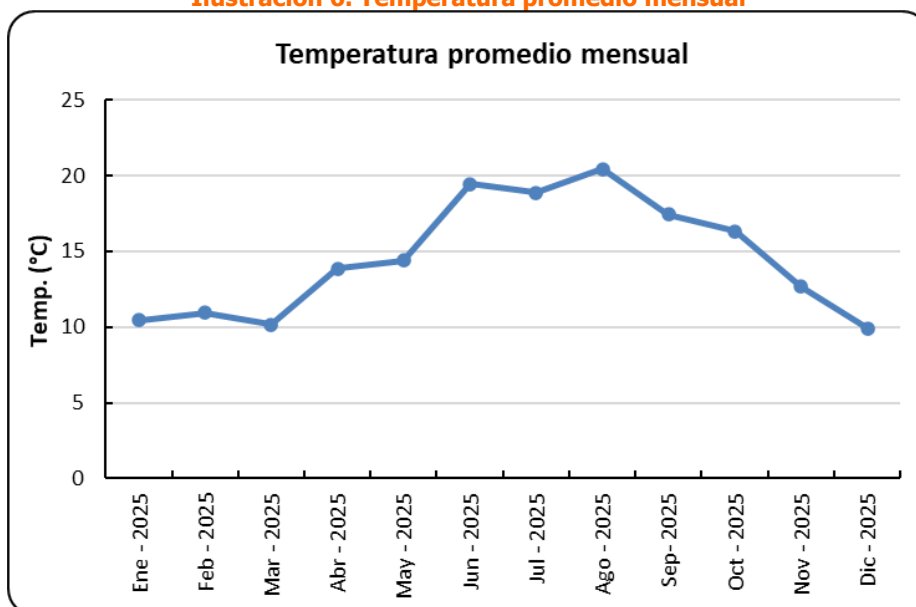


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.2.1 Temperatura

La Ilustración 6 muestra el comportamiento de la temperatura promedio mensual del año 2025. A nivel general, se observa que la temperatura media del periodo evaluado es de 14,58 °C. La temperatura máxima promedio mensual se presentó durante el mes de agosto alcanzando los 20,42 °C y el registro promedio mínimo mensual fue en el mes de diciembre con un valor de 9,93 °C.

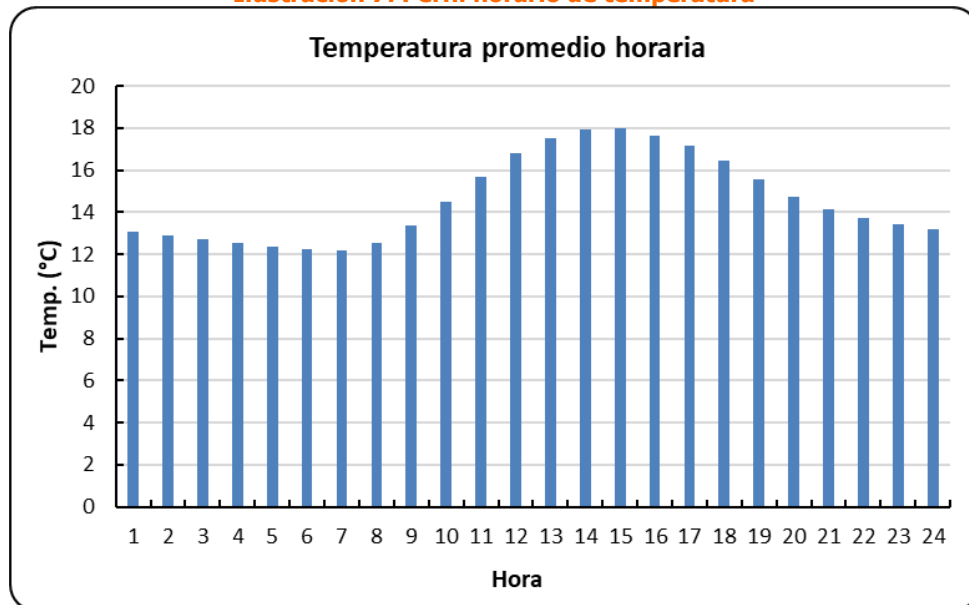
Ilustración 6. Temperatura promedio mensual



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

El perfil de temperatura horario (ver la Ilustración 7) presenta sus mayores promedios entre las horas 13 y 17 (01:00 p.m. - 5:00 p.m.); durante esta misma franja horaria se espera que los valores de radiación solar sean más elevados, debido a la perpendicularidad del ángulo de incidencia de la radiación sobre la superficie terrestre.

Ilustración 7. Perfil horario de temperatura

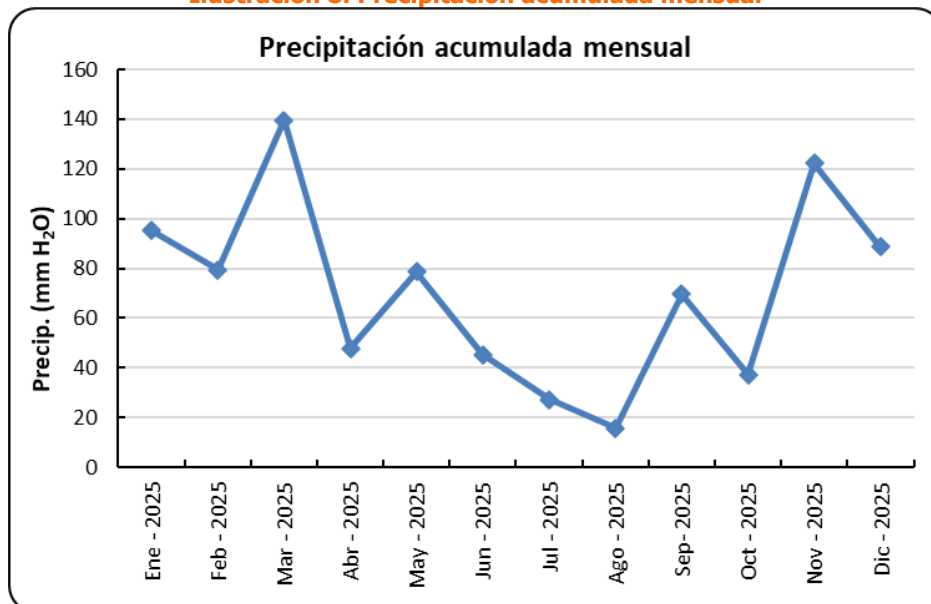


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.2.2 Precipitación

En la Ilustración 8 se observa el análisis de precipitación mensual para el año 2025. Se presenta una escala en los niveles de precipitación mensuales de 15,70 a 139,61 mm H₂O, siendo posible apreciar que el mes más lluvioso fue marzo (139,61 mm H₂O) y el menos lluvioso agosto (15,70 mm H₂O).

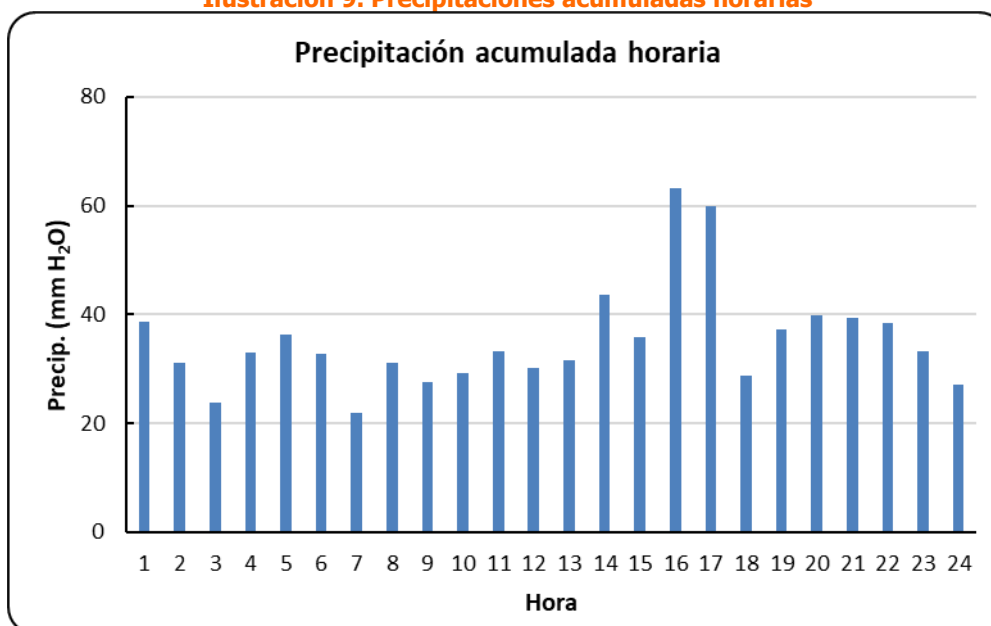
Ilustración 8. Precipitación acumulada mensual



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

La Ilustración 9 contiene las precipitaciones acumuladas horarias que muestran la tendencia de las lluvias en cada hora del día, siendo la hora 16 en la que se presentaron las mayores precipitaciones.

Ilustración 9. Precipitaciones acumuladas horarias

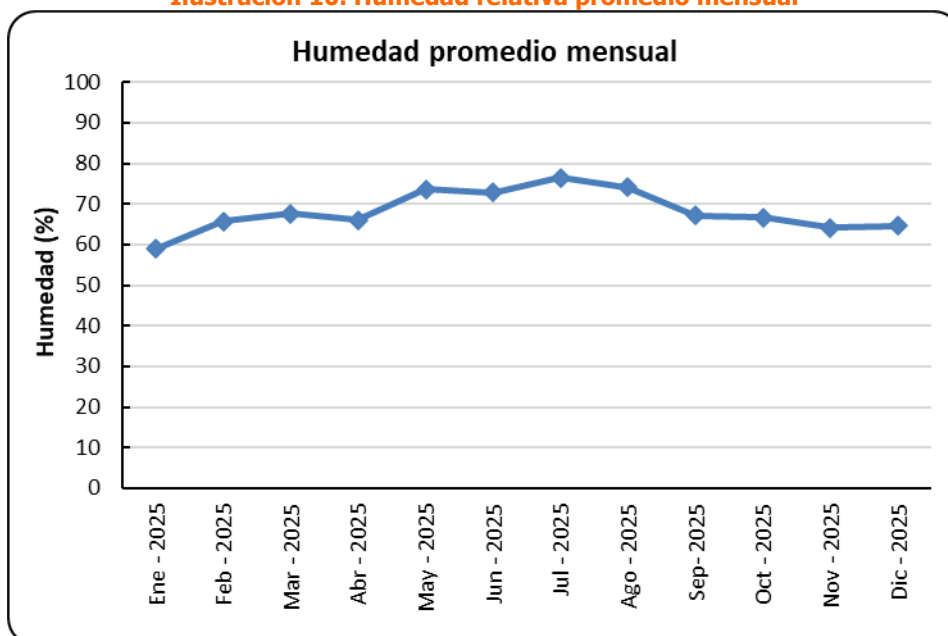


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.2.3 Humedad relativa

La Ilustración 10 expone la humedad relativa promedio durante el tiempo de análisis. Es posible observar que su valor máximo se alcanzó en el mes de julio con 76,39%, mientras que el mes de enero presentó la menor humedad, con un 58,99 %. El promedio mensual de humedad relativa en el año 2025 es de 68,13 %.

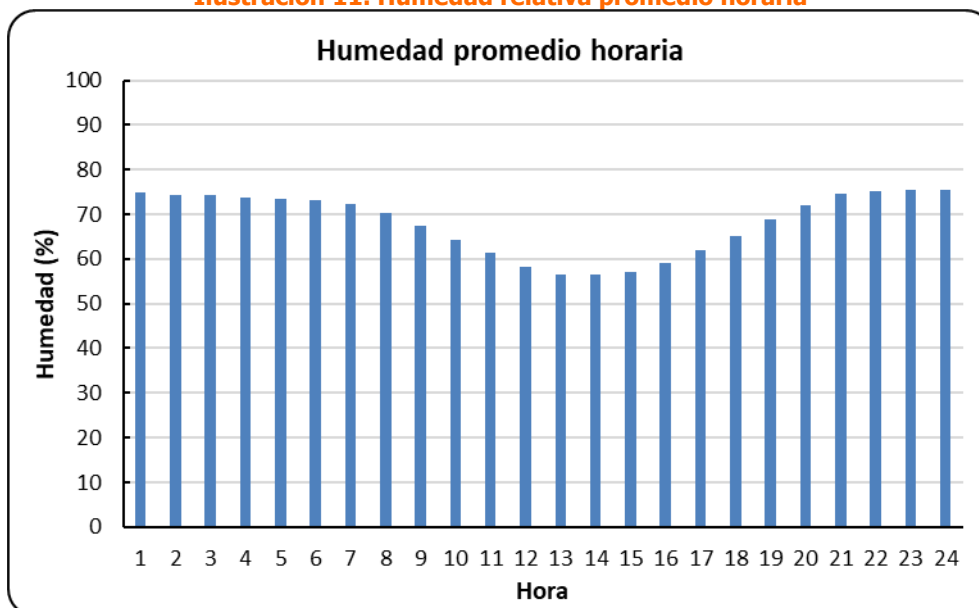
Ilustración 10. Humedad relativa promedio mensual



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

Así mismo, la Ilustración 11 muestra la variación de la humedad relativa promedio horario, siendo que, en horas de la madrugada y parte de la mañana, se observan los mayores porcentajes de humedad con tendencia a disminuir hasta las horas de la tarde. En horas de la noche, la humedad tiende nuevamente a aumentar.

Ilustración 11. Humedad relativa promedio horaria

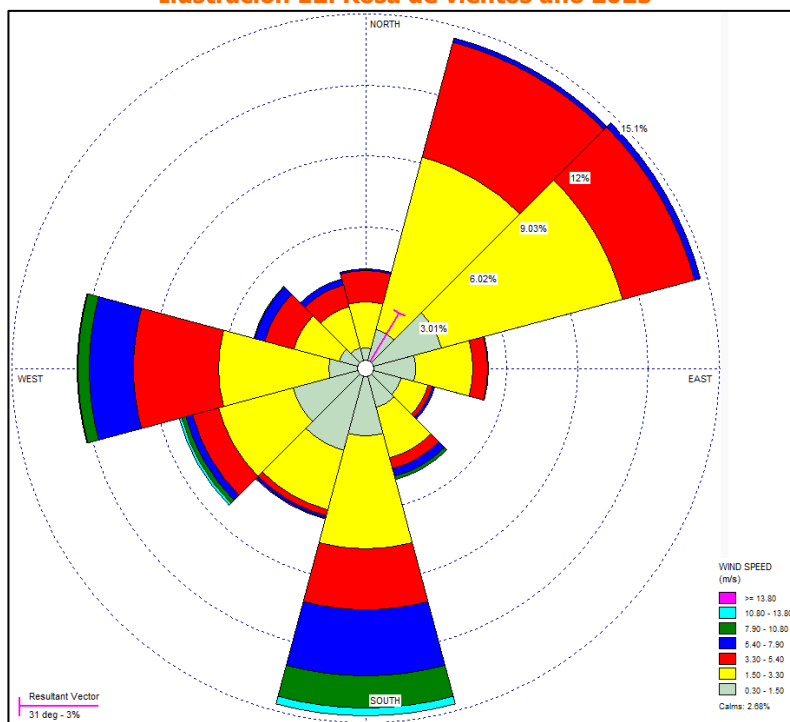


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.2.4 Velocidad y dirección del viento

Se utilizaron datos promedios horarios del año para determinar la velocidad y dirección de los vientos, estos son representados por la rosa de vientos (Ilustración 12) y la distribución de frecuencias (Ilustración 13). El programa procesador WRPLOT View, no tiene en cuenta velocidades con valores de cero (0) reportados por la modelación meteorológica WRF, ya que para velocidades cero, no se obtiene dirección.

Ilustración 12. Rosa de vientos año 2025

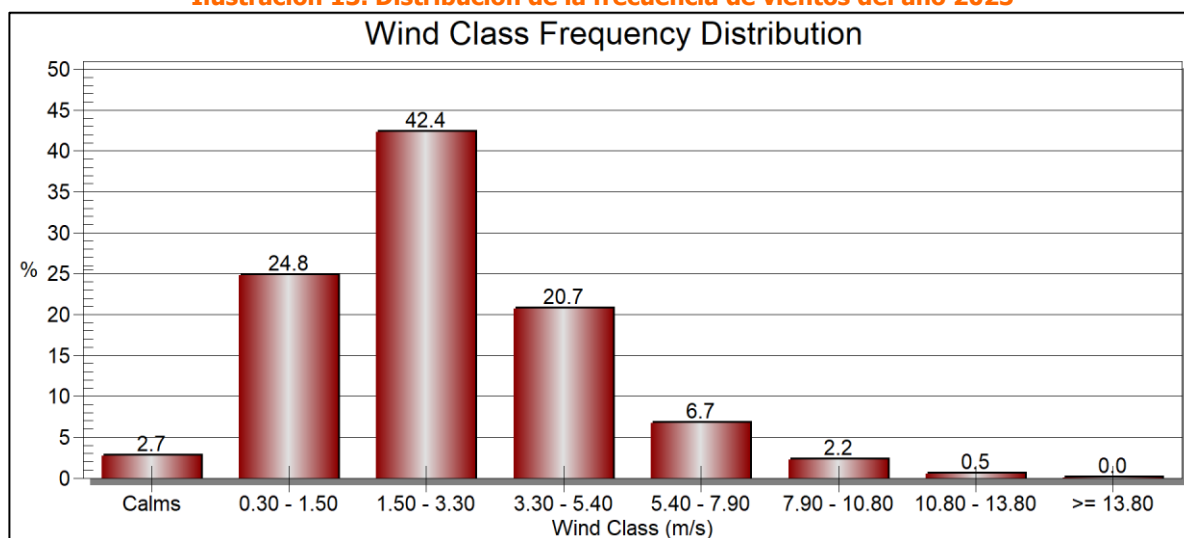


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual) - Datos meteorológicos graficados en software WRPLOT View (Lakes Environmental, 2016)

De acuerdo con los resultados de la Ilustración 12 se puede apreciar que los componentes predominantes provienen de la dirección Nornoreste (ENE) con el 14,73 %, Sur (S) con el 14,73 % y Nornoreste (NNE) 14,49 %.

En la Ilustración 13 se observa que los vientos se dieron con velocidades de 0,30 m/s a 1,50 m/s, catalogados como aire ligero (24,8 % de frecuencia), seguido de los vientos de 1,50 m/s a 3,30 m/s denominados como brisa ligera (42,4% de frecuencia), vientos de 3,30 a 5,40 m/s correspondientes a brisa suave (20,7 % de frecuencia), vientos de 5,40 a 7,90 m/s correspondientes a brisa moderada (6,7 % de frecuencia) y los periodos con calma presentan una frecuencia de 2,7 %. Esta categorización se presenta de acuerdo con la escala de vientos de Beaufort.

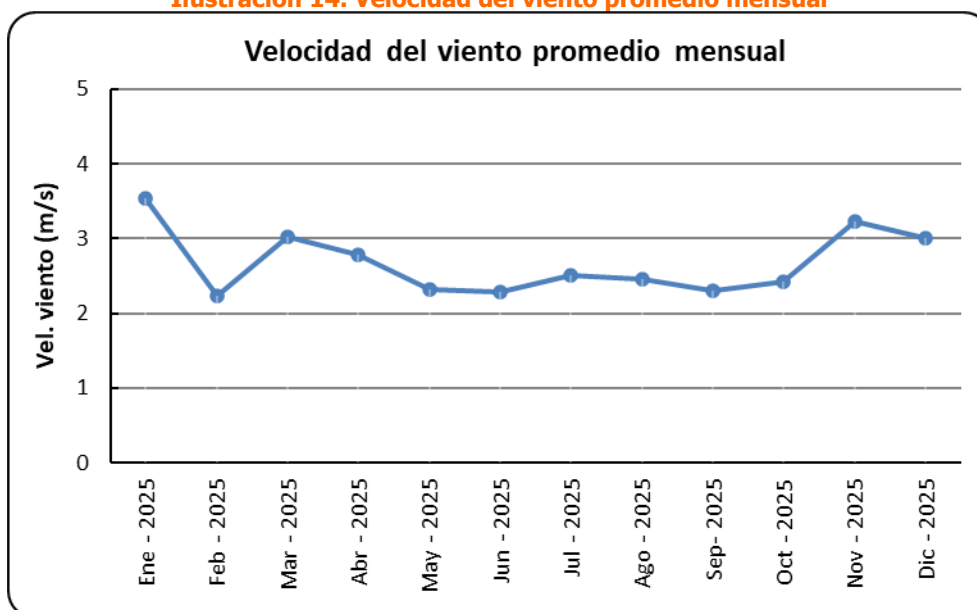
Ilustración 13. Distribución de la frecuencia de vientos del año 2025



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual) - Datos meteorológicos graficados en software WRPLOT View (Lakes Environmental, 2016)

En la Ilustración 14 se muestra el comportamiento de la velocidad del viento promedio mensual para el área del proyecto. La velocidad más alta se presentó en el mes de enero con 3,54 m/s, mientras el valor más bajo se observó en el mes de febrero con 2,23 m/s. La velocidad promedio fue de 2,67 m/s.

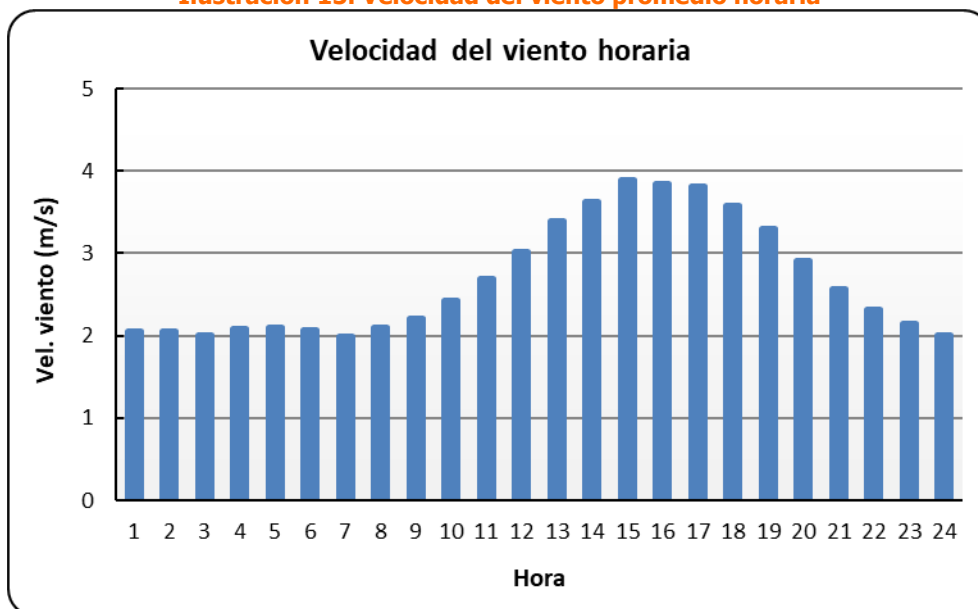
Ilustración 14. Velocidad del viento promedio mensual



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

La Ilustración 15 muestra la tendencia de vientos horaria, en donde las velocidades más altas se presentan en la hora 15 (3:00 p.m.) con valor de 3,90 m/s. Esta condición hace posible el arrastre de los contaminantes, debido a que cuanto mayor sea la velocidad del viento mayor será la dispersión de los contaminantes.

Ilustración 15. Velocidad del viento promedio horaria

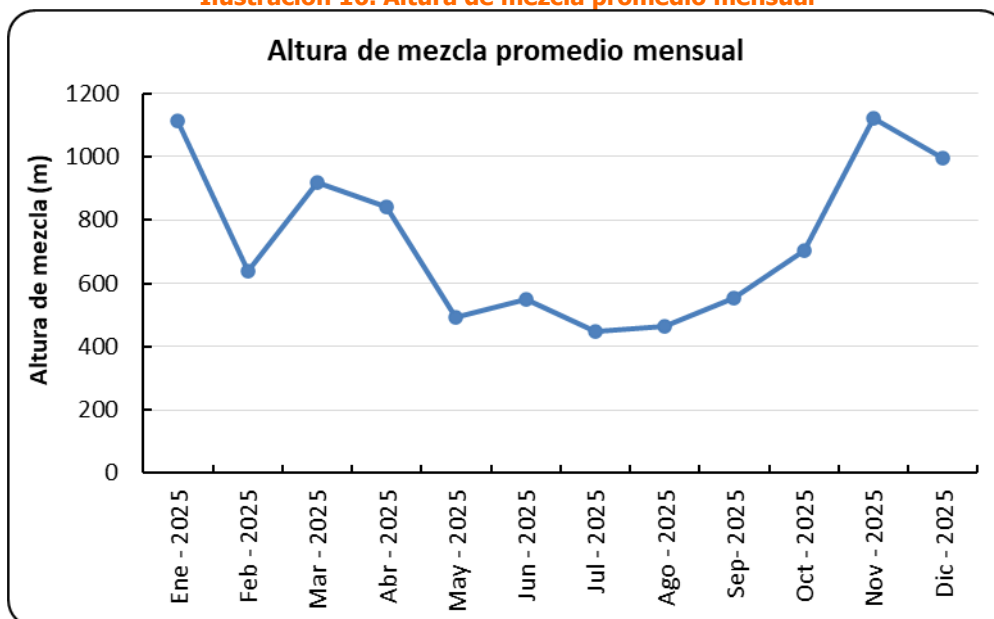


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.2.5 Altura de mezcla

En la Ilustración 16 se presenta la altura de mezcla calculada a partir de modelación meteorológica WRF para el periodo de enero a diciembre de 2025, indicando que el valor más elevado se presentó en el mes de noviembre (1.119,88 m).

Ilustración 16. Altura de mezcla promedio mensual



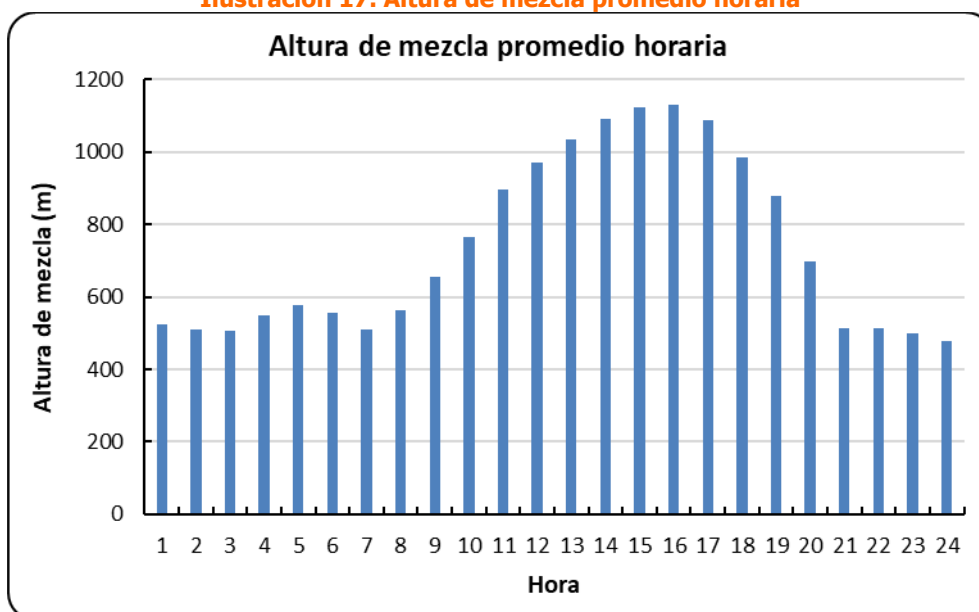
Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

Después de la puesta de sol, la superficie terrestre no recibe radiación solar, pero sí existe una irradiancia en onda larga, consecuentemente, el suelo y el aire en contacto con él, así como las capas

más bajas de la atmósfera, se van enfriando más rápidamente que el aire en las capas más altas. De esta forma, se obtiene un aumento de la temperatura con la altura y, por tanto, una capa térmicamente estable en la parte inferior de la atmósfera donde el aire con estratificación estable tiende a suprimir la turbulencia (Rodríguez, 2015).

En el horario diurno ocurre el proceso inverso, en las primeras horas de la mañana la altura de la capa de mezcla comienza a crecer, debido al aumento gradual de la temperatura y de la turbulencia atmosférica, provocado por la radiación solar, alcanzando su máximo valor muy próximo a los 1.128,99 m a la hora 16 (4:00 p.m.), como se observa en la Ilustración 17.

Ilustración 17. Altura de mezcla promedio horaria



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.2.6 Estabilidad atmosférica

Se entiende por estabilidad atmosférica la condición que determina el estado de equilibrio de las parcelas de aire. Para evaluar las condiciones de estabilidad atmosférica, la EPA toma como esquema de referencia el sistema propuesto por Pasquill-Gifford en 1961, el cual adopta un esquema de clasificación de la estabilidad en función de variables en superficies como son velocidad del viento, ángulo de elevación del sol, balance de radiación, gradiente vertical de temperatura desde la superficie, entre otras para la estimación en modelos gaussianos de dispersión atmosférica [11].

Aplicando la teoría de la similitud de Monin-Obukhov (L) al sistema Pasquill-Gifford es posible determinar la función de estabilidad atmosférica, indica que la atmósfera es muy inestable cuando $1/L < -0,056$, inestable cuando $-0,056 \leq 1/L < -0,016$, moderadamente inestable cuando $0,016 \leq 1/L < 0,004$, neutra cuando $-0,004 \leq 1/L < 0,002$, moderadamente estable cuando $0,002 \leq 1/L < 0,006$, estable cuando $0,006 \leq 1/L < 0,022$, extremadamente estable cuando $1/L \geq 0,022$.

El modelo meteorológico WRF determina las longitudes de Monin-Obukhov a través de funciones empíricas y modelos numéricos que dependen de la temperatura, rugosidad superficial del lugar, flujos de calor y de humedad, la viscosidad dinámica del medio fluido, y demás variables propias de los fenómenos de transporte. La Tabla 13 presenta las longitudes Monin-Obukhov resultantes para el modelo meteorológico WRF aplicado al actual estudio.

Tabla 13. Estabilidad atmosférica - Longitud Monin-Obukhov del modelo WRF

Mes	Cantidad A	Cantidad B	Cantidad C	Cantidad D	Cantidad E	Cantidad F	Cantidad G
Enero	84	13	10	251	56	78	252
Febrero	124	26	23	99	58	78	264
Marzo	107	47	33	179	57	63	258
Abril	163	49	34	158	46	42	228
Mayo	244	60	42	80	32	31	255
Junio	265	58	23	89	12	24	249
Julio	243	86	36	56	23	21	279
Agosto	246	57	19	101	25	33	263
Septiembre	171	57	28	87	27	68	282
Octubre	139	36	16	168	36	62	287
Noviembre	46	35	45	231	96	79	188
Diciembre	61	17	18	220	63	86	279
Total	1.893	541	327	1.719	531	665	3.084

Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

De acuerdo con la anterior tabla, se observa que las condiciones de estabilidad (categorías E, F y G) presentan 4.280 datos horarios, mientras que las condiciones de inestabilidad (categorías A, B y C) muestran 2.761 datos horarios, indicando que la atmósfera refleja un comportamiento estable en la mayoría del tiempo evaluado. Cabe señalar, que existen 1.719 datos horarios que registraron una condición neutra (categoría D).

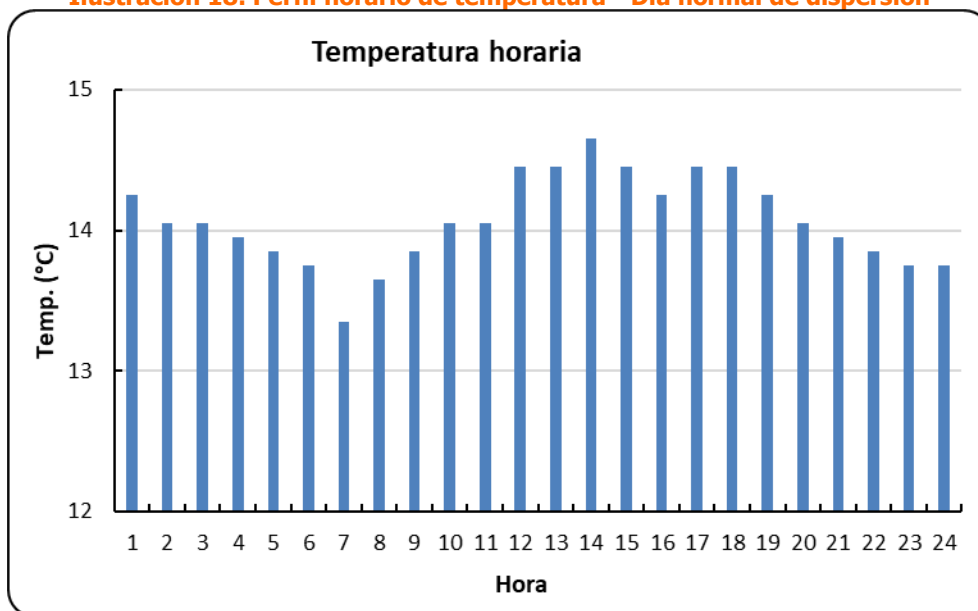
4.6.3 Análisis meteorológico día normal de dispersión

Para la simulación del escenario de dispersión promedio, se definió el 2 de junio de 2025 como el día representativo del comportamiento meteorológico anual. Dicha jornada refleja el perfil medio de la capa límite atmosférica en el sitio del proyecto, considerando la distribución típica de la rosa de vientos, la temperatura y la precipitación. Las variables meteorológicas evaluadas para este escenario se detallan a continuación.

4.6.3.1 Temperatura

La temperatura promedio registrada el 02 de junio de 2025 fue de 14,07 °C. La Ilustración 18 presenta el perfil de temperatura horario, evidenciándose la mayor temperatura en la hora 14.

Ilustración 18. Perfil horario de temperatura - Día normal de dispersión

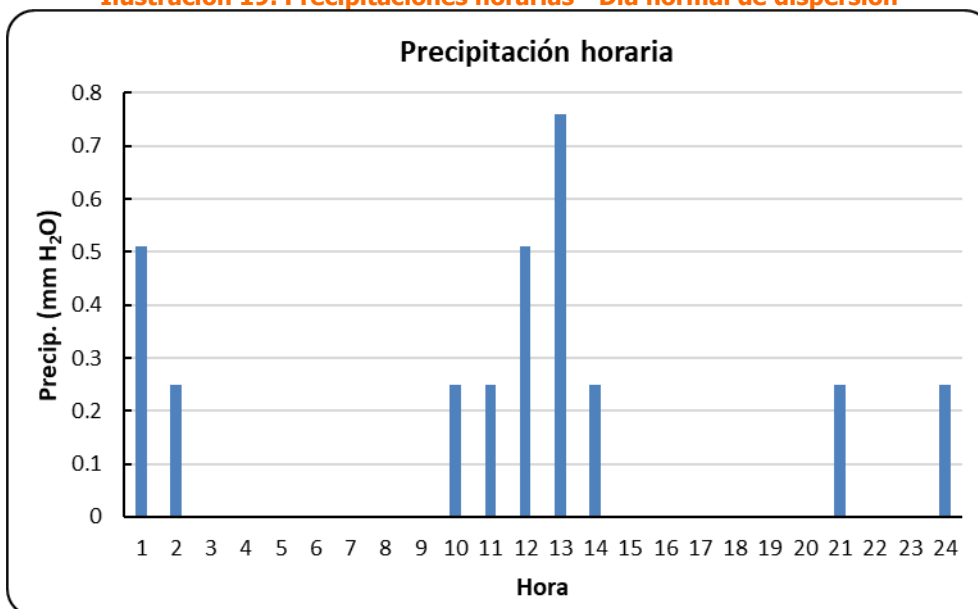


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.3.2 Precipitación

La Ilustración 19 muestra el comportamiento horario de la precipitación acumulada durante el día, con un máximo de precipitación a las 13 horas.

Ilustración 19. Precipitaciones horarias - Día normal de dispersión

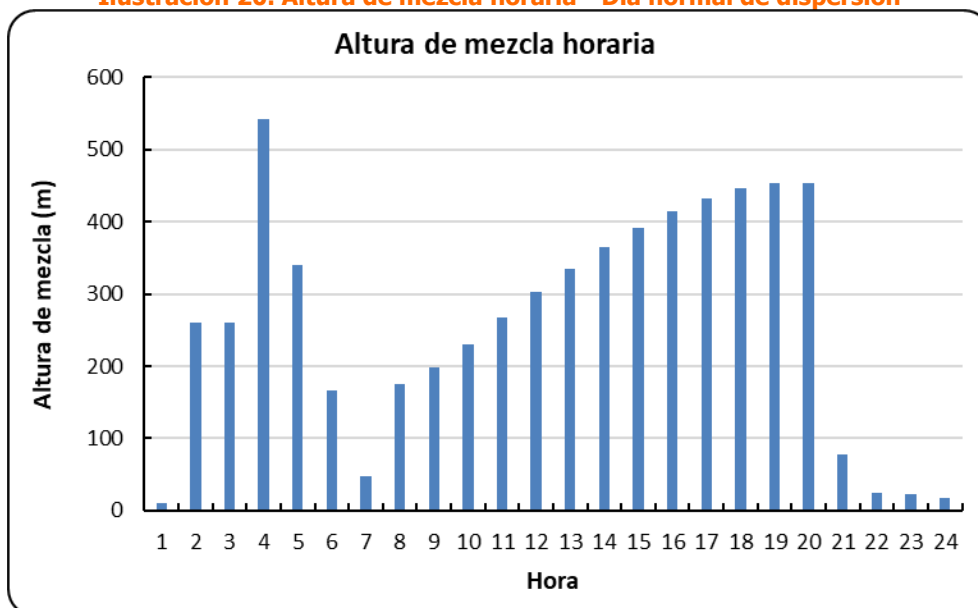


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.3.3 Altura de mezcla

En la Ilustración 20 se observa el comportamiento de la altura de mezcla evidenciando condiciones de dispersión moderadas durante gran parte del día, con una mejora significativa en las horas de la tarde y una reducción de la capacidad dispersiva durante la mañana y la noche, características propias de un escenario meteorológico representativo de condiciones normales de dispersión atmosférica.

Ilustración 20. Altura de mezcla horaria - Día normal de dispersión

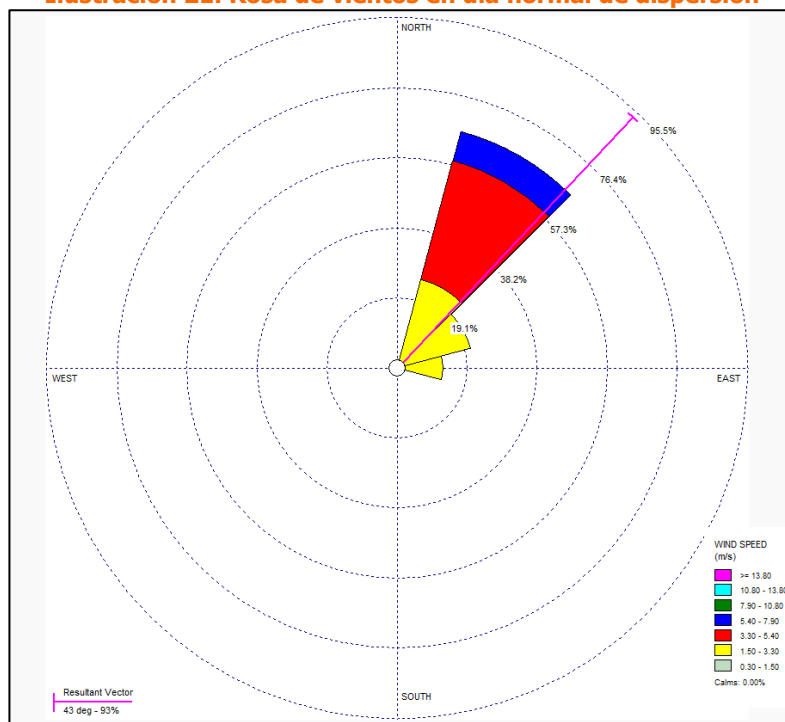


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.3.4 Velocidad y dirección del viento

En la Ilustración 21 se observa la rosa de vientos para el día normal de dispersión, los componentes predominantes provienen de la dirección Nornoreste (NNE) con un 66,6 %, seguido de la dirección Estenoreste (ENE) con un 20,8 % y finalmente de la dirección Este (E) con un 12,5 %.

Ilustración 21. Rosa de vientos en día normal de dispersión

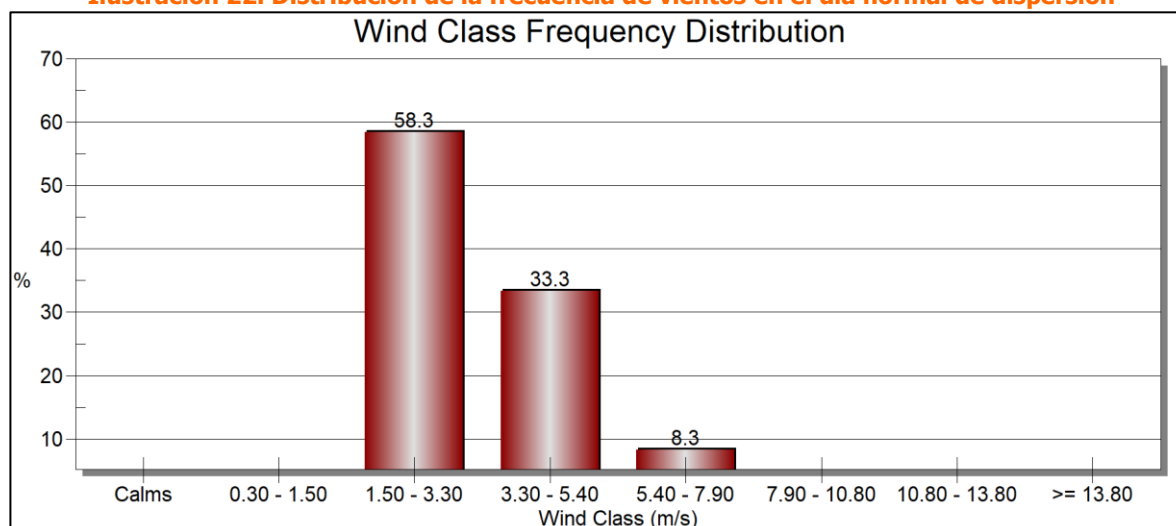


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual) - Datos meteorológicos graficados en software WRPLOT View (Lakes Environmental, 2016)

En la Ilustración 22 se observa que las velocidades del viento se distribuyeron principalmente en el rango de 1,50 a 3,30 m/s, clasificadas como brisa ligera, con una frecuencia de ocurrencia del 58,3 %.

En segundo lugar, se registraron velocidades entre 3,30 y 5,40 m/s, correspondientes a brisa suave, las cuales representaron el 33,3 % de los registros. Finalmente, se presentaron velocidades entre 5,40 y 7,90 m/s, clasificadas como brisa moderada, con una frecuencia del 8,3 %. Esta categorización se presenta de acuerdo con la escala de vientos de Beaufort.

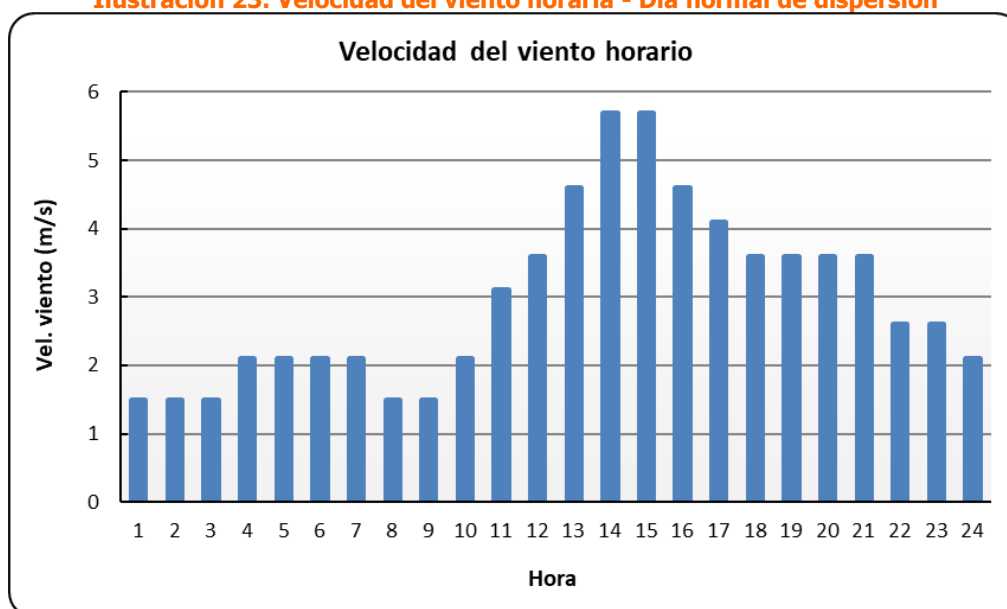
Ilustración 22. Distribución de la frecuencia de vientos en el día normal de dispersión



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual) - Datos meteorológicos graficados en software WRPLOT View (Lakes Environmental, 2016)

En la siguiente imagen se presenta la velocidad del viento horaria para el día normal de dispersión, donde la velocidad máxima fue de 5,70 m/s, mientras que la velocidad mínima fue de 1,50 m/s. La velocidad promedio fue de 2,96 m/s.

Ilustración 23. Velocidad del viento horaria - Día normal de dispersión



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.4 Análisis meteorológico peor día de dispersión

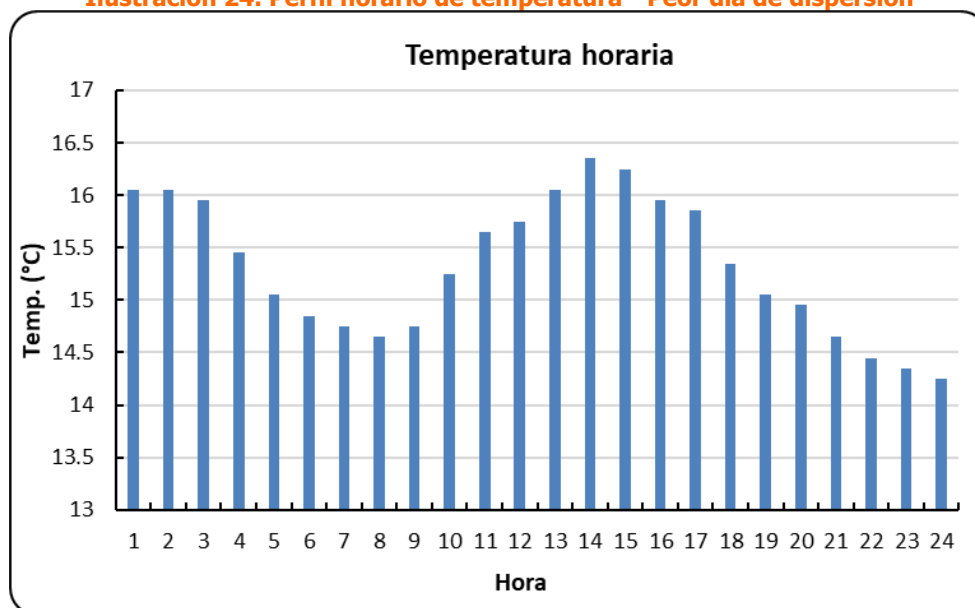
Tras el estudio de los datos meteorológicos del año y las condiciones de dispersión, el 14 de junio de 2025 fue seleccionado como el escenario correspondiente al día con las condiciones más desfavorables para la dispersión atmosférica de contaminantes al registrar bajas alturas de mezcla y una predominancia de los vientos hacia el área poblacional de Oviedo con bajas velocidades de viento,

principalmente. A continuación, se describen las principales variables meteorológicas registradas durante esta jornada.

4.6.4.1 Temperatura

La temperatura promedio registrada el 14 de junio de 2025 fue de 15,32 °C. La Ilustración 24 presenta el perfil de temperatura horario, evidenciándose las mayores temperaturas en las horas 14 y 15.

Ilustración 24. Perfil horario de temperatura - Peor día de dispersión

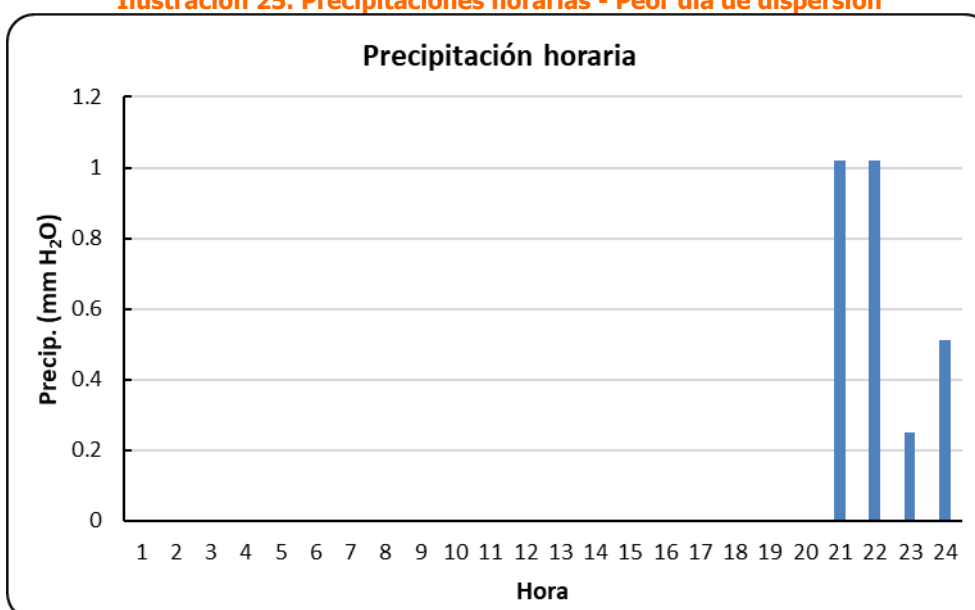


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.4.2 Precipitación

La Ilustración 25 muestra el comportamiento horario de la precipitación acumulada durante el día. Los resultados evidencian que los máximos valores de precipitación ocurrieron entre las 21 y 22 horas.

Ilustración 25. Precipitaciones horarias - Peor día de dispersión

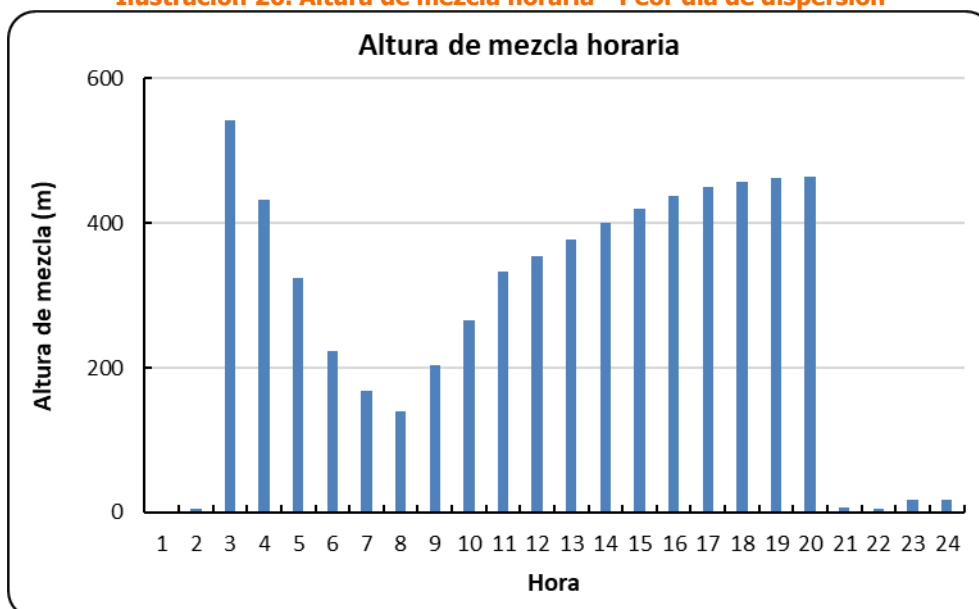


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.4.3 Altura de mezcla

En la Ilustración 26 se observan bajas temperaturas de mezclas durante las horas de la mañana y en la noche, indicando una reducida capacidad de dispersión atmosférica, razón por la cual este día fue seleccionado como el escenario más desfavorable para la dispersión de contaminantes.

Ilustración 26. Altura de mezcla horaria - Peor día de dispersión

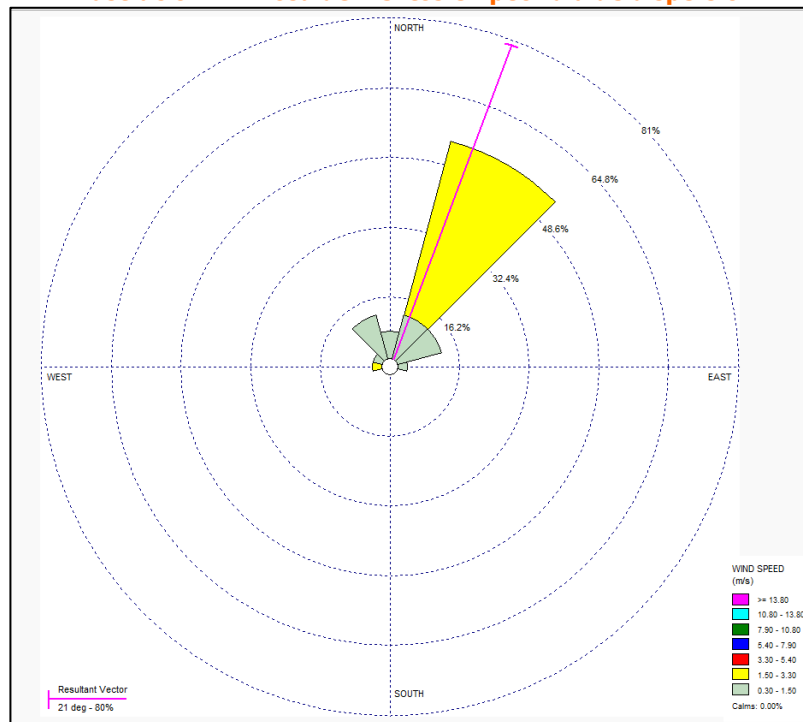


Fuente: Applus (Estudio actual)

4.6.4.4 Velocidad y dirección del viento

En la Ilustración 27 se observa la rosa de vientos para el peor día de dispersión, los componentes predominantes provienen de la dirección Nornoreste (NNE) con un 54,16 %, lo cual dirige los vientos hacia la zona poblada de Oviedo.

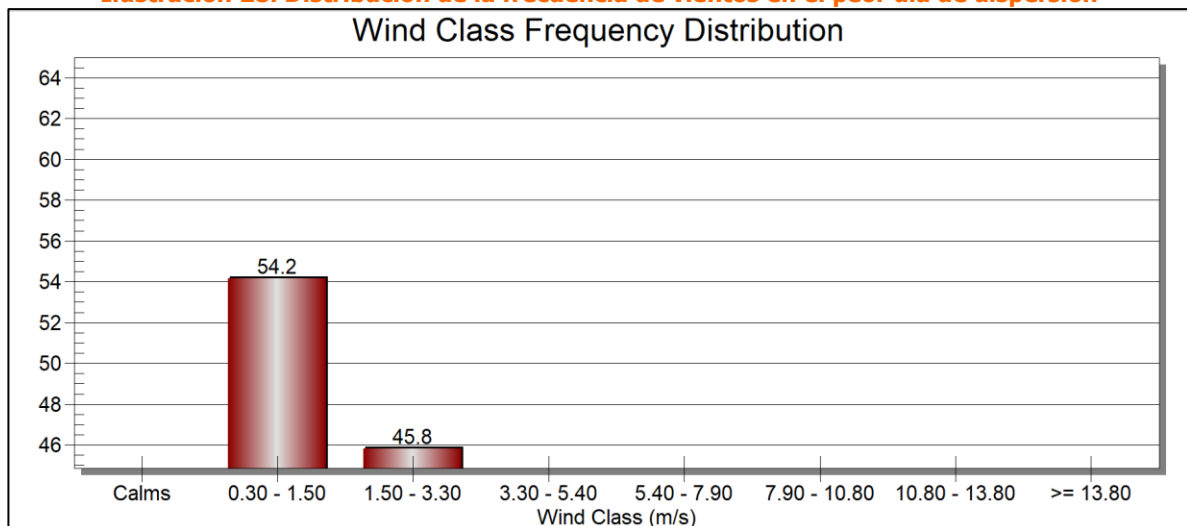
Ilustración 27. Rosa de vientos en peor día de dispersión



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual) - Datos meteorológicos graficados en software WRPLOT View (Lakes Environmental, 2016)

En la Ilustración 28 se observa que los vientos se dieron con velocidades de 0,30 m/s a 1,50 m/s catalogados como aire ligero (54,2 % de frecuencia) y vientos de 1,50 m/s a 3,30 m/s (45,8 % de frecuencia). Esta categorización se presenta de acuerdo con la escala de vientos de Beaufort.

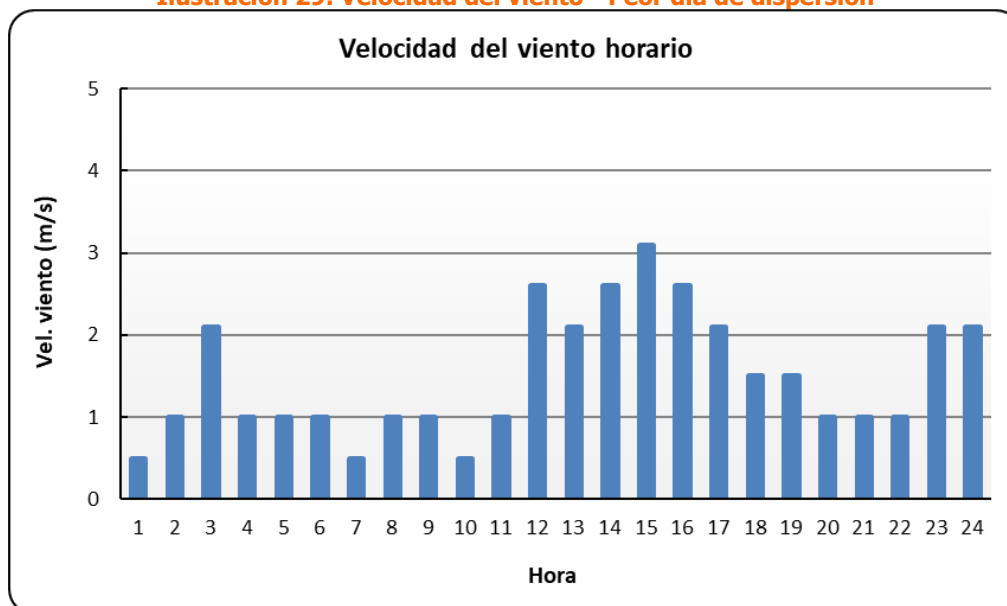
Ilustración 28. Distribución de la frecuencia de vientos en el peor día de dispersión



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual) - Datos meteorológicos graficados en software WRPLOT View (Lakes Environmental, 2016)

En la siguiente ilustración se presentan las velocidades del viento horario, la velocidad máxima es de 3,10 m/s, mientras que el valor más bajo es de 0,50 m/s. La velocidad del viento promedio es de 1,50 m/s.

Ilustración 29. Velocidad del viento - Peor día de dispersión



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

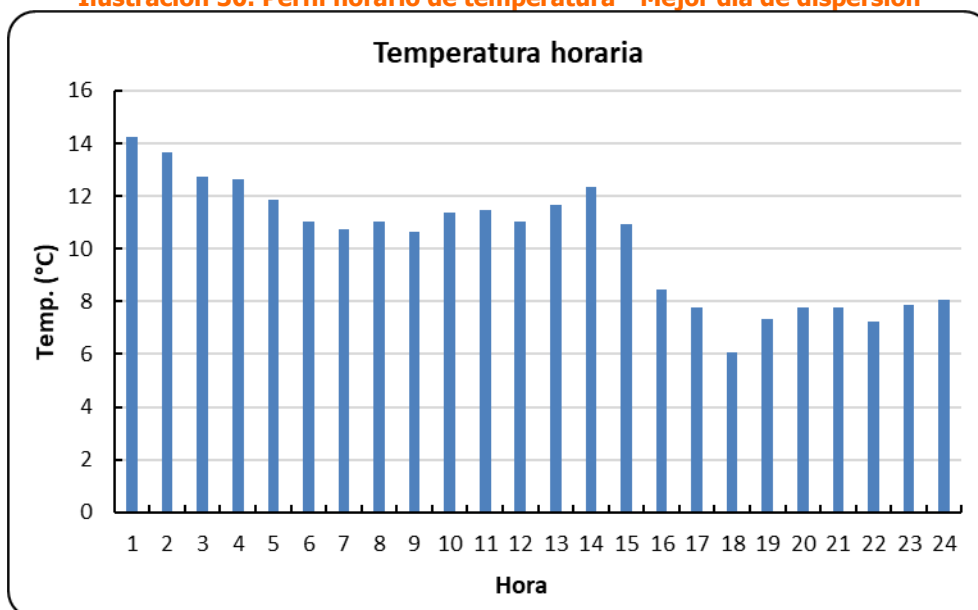
4.6.5 Análisis meteorológico mejor día de dispersión

De manera análoga a lo realizado para la selección de los demás días de referencia, se realizó un análisis detallado del que resultó el 27 de enero de 2025 como el escenario correspondiente al día con las mejores condiciones meteorológicas de dispersión atmosférica de contaminantes al registrar altas alturas de mezcla y una predominancia de los vientos hacia las estribaciones de Oviedo con altas velocidades de viento, principalmente. A continuación, se describen las principales variables meteorológicas registradas durante esta jornada.

4.6.5.1 Temperatura

La temperatura promedio registrada el 27 de enero de 2025 fue de 10,24 °C.

Ilustración 30. Perfil horario de temperatura - Mejor día de dispersión

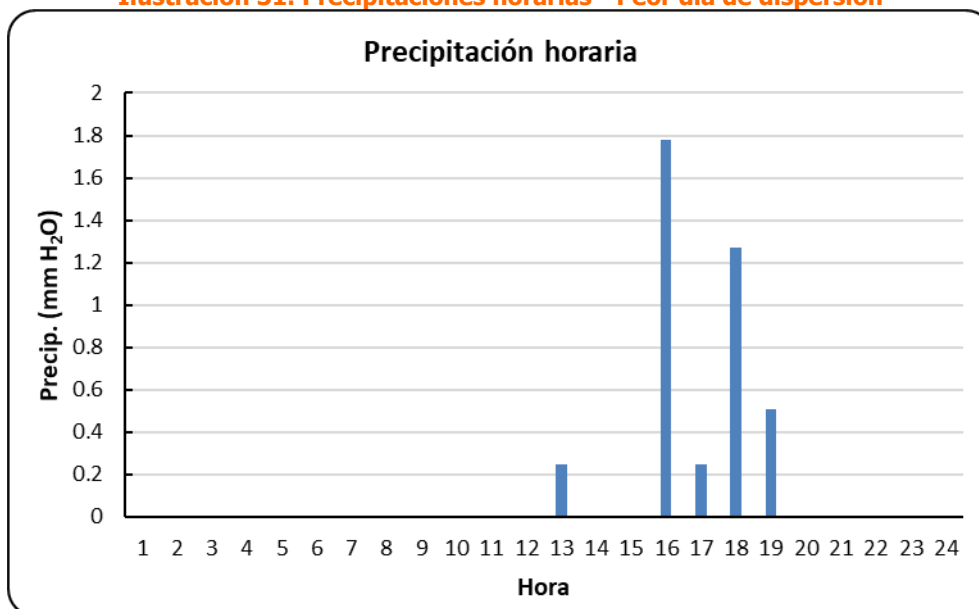


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.5.2 Precipitación

La Ilustración 31 muestra el comportamiento horario de la precipitación acumulada durante el día. Los resultados evidencian que los máximos valores de precipitación ocurrieron a las horas 16 y 18.

Ilustración 31. Precipitaciones horarias - Peor día de dispersión

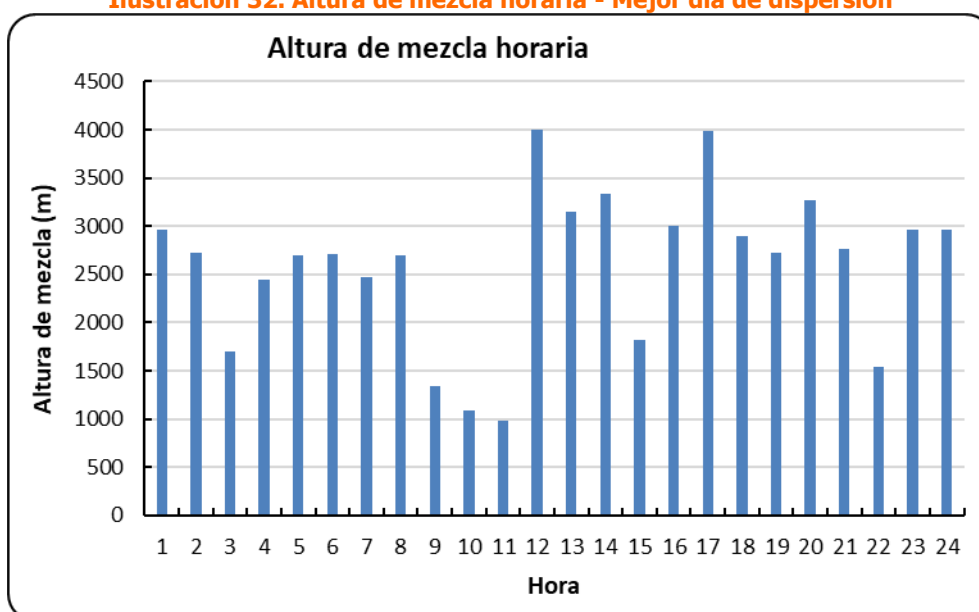


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.5.3 Altura de mezcla

En la Ilustración 32 se observa el predominio de alturas de mezcla elevadas durante la mayor parte del día, que muestran una atmósfera con una capacidad de dispersión superior.

Ilustración 32. Altura de mezcla horaria - Mejor día de dispersión

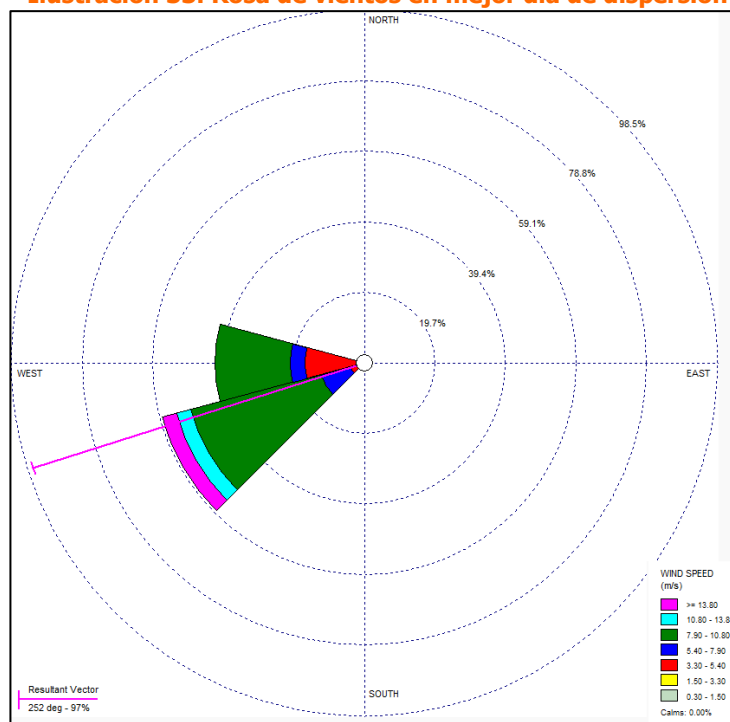


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

4.6.5.4 Velocidad y dirección del viento

En la Ilustración 33 se observa la rosa de vientos para el mejor día de dispersión, los componentes predominantes provienen de la dirección Oesuroeste (WSW) con un 58,33 % y de la dirección Oeste (W) con 41,6 %. Esto indica que los vientos tienden a dirigirse hacia las zonas no habitables de Oviedo.

Ilustración 33. Rosa de vientos en mejor día de dispersión

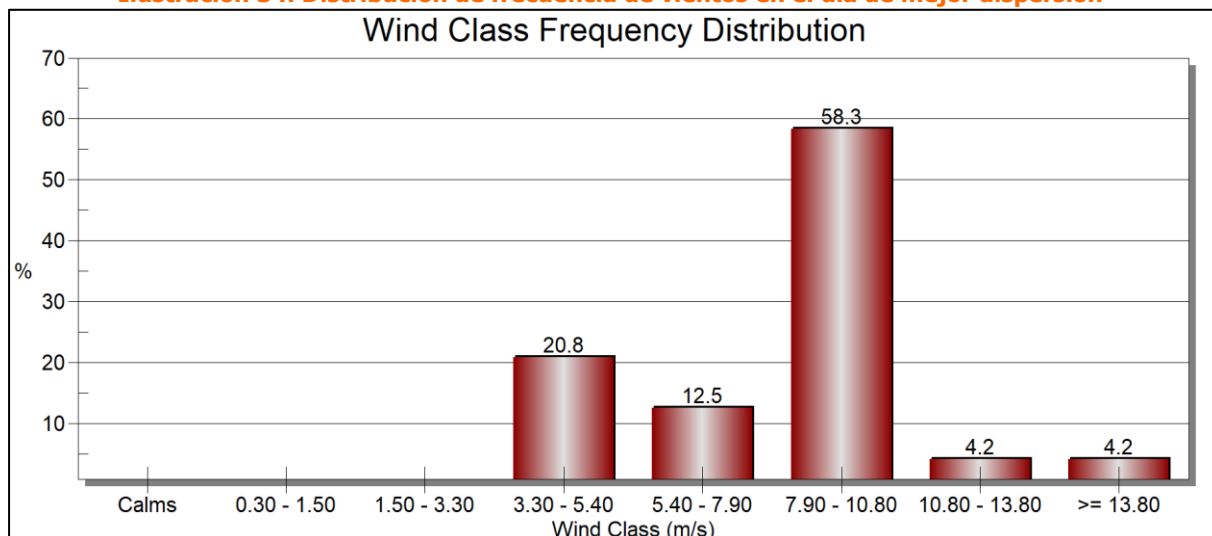


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual) - Datos meteorológicos graficados en software WRPLOT View (Lakes Environmental, 2016)

En la ilustración 41 se observa que las velocidades del viento se distribuyeron principalmente en el rango de 7,90 a 10,80 m/s, clasificadas como brisa fresca, con una frecuencia de ocurrencia del 58,3 %. En segundo lugar, se registraron velocidades entre 3,30 y 5,40 m/s, correspondientes a brisa suave, con una frecuencia del 20,8 %. Asimismo, las velocidades comprendidas entre 5,40 y 7,90 m/s, catalogadas como brisa moderada, representaron el 12,5 % de los registros. Finalmente, las categorías de velocidad entre 10,80 y 13,80 m/s y mayores o iguales a 13,80 m/s presentaron una frecuencia de ocurrencia del 4,2 % cada una. Esta categorización se presenta de acuerdo con la escala de vientos de Beaufort.

Estos resultados evidencian el predominio de vientos de intensidad moderada a alta durante la jornada, condición que favorece el transporte y la dispersión de los contaminantes atmosféricos.

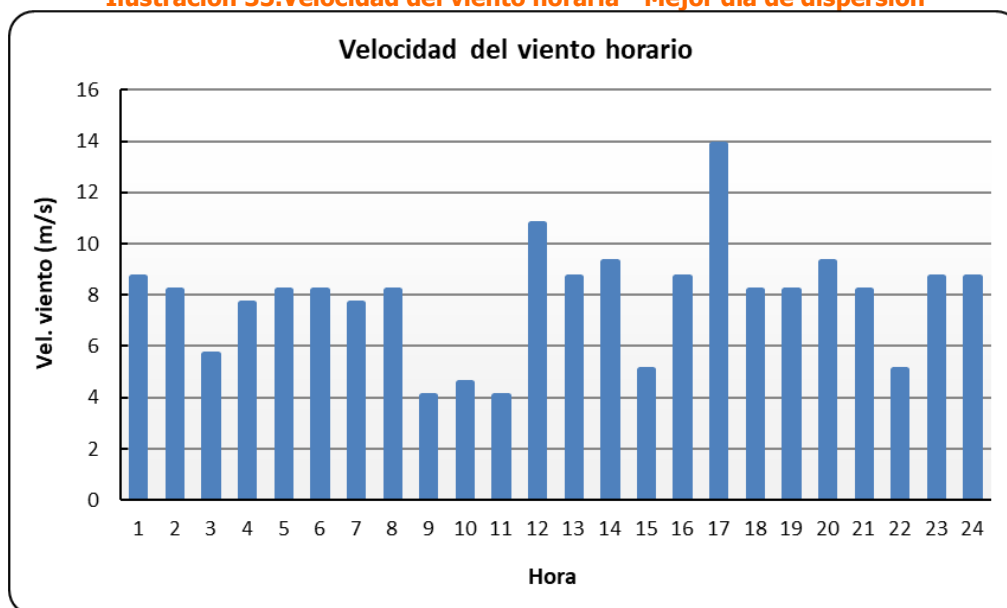
Ilustración 34. Distribución de frecuencia de vientos en el día de mejor dispersión



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual) - Datos meteorológicos graficados en software WRPLOT View (Lakes Environmental, 2016)

En la siguiente imagen se presenta la velocidad del viento horaria, la mayor velocidad presentada es de 13,90 m/s, el valor mínimo es de 4,10 m/s. La velocidad promedio fue de 7,85 m/s.

Ilustración 35. Velocidad del viento horaria - Mejor día de dispersión



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

5 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

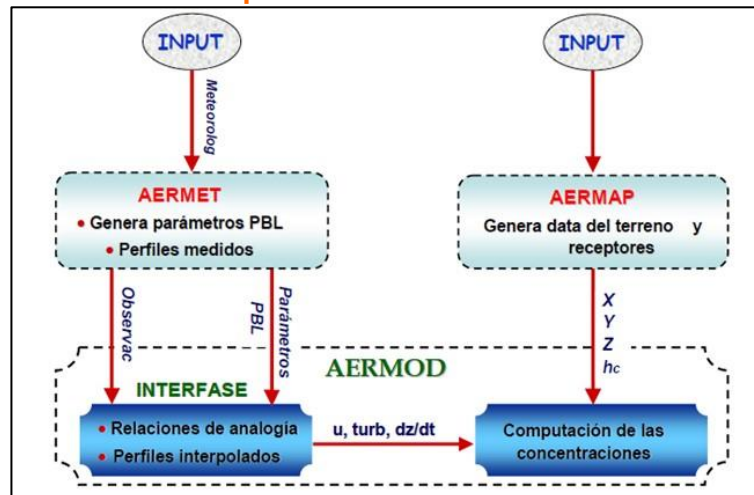
5.1 Modelo AERMOD

De todos los modelos actualmente disponibles son pocos los reconocidos por instituciones de prestigio y relevancia internacional. Por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA, por su sigla en inglés), muestran preferencia y recomienda ampliamente el uso del modelo gaussiano AERMOD para describir la dispersión de fuentes fijas, área, volumen, entre otros (Environmental Protection Agency (US EPA), 2009).

AERMOD (American Meteorology Society - E.P.A. Regulatory Model) es un modelo desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Es un modelo de pluma de estado estacionario

que asume que las concentraciones en todas las distancias están gobernadas por la meteorología promedio de una hora (Environmental Protection Agency (US EPA), 2009). La Ilustración 36 muestra el diagrama de flujo para el procesamiento de información en el modelo de dispersión AERMOD, que consiste en un módulo principal (AERMOD) y dos preprocesadores (AERMET y AERMAP).

Ilustración 36. Esquema del sistema de modelación AERMOD



Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México (Cabrera, F; Universidad Nacional Autónoma de México, 2008)

AERMET usa mediciones meteorológicas representativas del dominio de modelación para calcular parámetros de la capa límite. La interfase interna de AERMOD usa estos parámetros calculados para generar perfiles de viento, temperatura y turbulencia (Environmental Protection Agency (US EPA), 2009). La profundidad de la capa límite y la dispersión de los contaminantes dentro de ésta están influenciadas a escala local por las características superficiales: rugosidad, albedo y radio de Bowen. Estas variables de superficie, junto con observaciones meteorológicas básicas (velocidad de viento, dirección de viento, temperatura y cobertura de nubes) son datos requeridos por AERMET para calcular los siguientes parámetros de la capa límite planetaria (PBL, por su sigla en inglés) (Environmental Protection Agency (US EPA), 2009):

1. Velocidad de fricción, u^*
2. Longitud de Monin-Obukhov, L
3. Escala de velocidad convectiva, w^*
4. Escala de temperatura, θ^*
5. Altura de la capa de mezcla convectiva (zic) y mecánica (zim)
6. Flujo de calor superficial, H

La estabilidad de la capa límite planetaria (PBL) está dada por el signo de H (convectivo para $H > 0$ y estable para $H < 0$).

El preprocesador de terreno AERMAP emplea la información topográfica para calcular la influencia del terreno en la dispersión, obteniendo una mejor valoración del escalamiento de altura del terreno en la concentración del material dispersado (Cabrera, F; Universidad Nacional Autónoma de México, 2008). AERMAP también es usado para crear el mallado y las elevaciones de los receptores. Para cada receptor, el preprocesador AERMAP pasa la siguiente información hacia AERMOD: ubicación del receptor (x_r , y_r), altura sobre el nivel promedio del mar (z_r) y la escala de altura del terreno para un receptor específico (h_c) (Environmental Protection Agency (US EPA), 2009).

Para terreno complejo, AERMOD incorpora el concepto de la línea divisora de corriente para condiciones establemente estratificadas. Dependiendo del caso, la pluma es modelada combinando dos posibles casos: pluma de estado horizontal y/o pluma de estado topográfico. En terreno plano los dos estados son equivalentes, pero cuando se incorpora el concepto de la línea divisora de corriente en terreno elevado, la concentración total es calculada como la suma ponderada de las concentraciones asociadas

a estos dos estados de la pluma (Environmental Protection Agency (US EPA), 2009). La ponderación de los dos estados depende de:

- El grado de estabilidad atmosférica.
- La velocidad de viento.
- La altura de la pluma con respecto al terreno.

AERMOD caracteriza la PBL por medio de un “escalamiento” de la capa de mezcla. Para ello, AERMOD construye perfiles verticales de velocidad de viento, dirección de viento, turbulencia y temperatura, basados en mediciones de campo y extrapolaciones. Sólo se requiere de una medición en superficie de la velocidad de viento (medido entre z_0 y 100 m, donde z_0 es la rugosidad superficial). AERMOD también requiere de datos de cobertura de nubes, al igual que de un radiosondeo en la mañana para calcular la altura de mezcla convectiva a lo largo del día. Las características de superficie (rugosidad superficial, radio de Bowen y albedo) son también entradas requeridas para construir los perfiles de “analogía” de los parámetros de la PBL (Environmental Protection Agency (US EPA), 2009). Cabe mencionar también que, en caso de no contar con alguno de estos parámetros, el preprocesador AERMET los estima.

5.2 Variables meteorológicas de entrada del modelo AERMOD

En la Tabla 14 se presentan todas las variables meteorológicas que puede requerir AERMOD dependiendo de las opciones seleccionadas.

Tabla 14. Parámetros modelo AERMOD

Tipo		Símbolo	Descripción
Terreno		ED	Elevación digital
		US	Uso de suelos
Meteorología	Parámetros meteorológicos	v	Velocidad del viento
		T	Temperatura ambiente
		Dv	Dirección del viento
		EA	Estabilidad Atmosférica
		Hrur	Altura de capa de mezcla rural
		Hurb	Altura de capa de mezcla urbana
		f v	Velocidad de fricción
		LMO	Longitud de Monin Obhukov
		R	Rugosidad
		Pc	Código de Precipitación
		Pr	Tasa de Precipitación
		FC	Flujo de Calor Sensible
		EV	Escala de velocidad convectiva
		B	Parámetro de Bowen
		A	Albedo de medio día
	Radio sondeo	PRE	Presión
		DIFTRC	Diferencia con la temperatura de rocío
		ALT	Altura sondeo
	EMA	WSMDir	Dirección del viento más alto
		WSMK	Velocidad del viento más alto
		AvgRh	Humedad relativa promedio
		AvgSR	Radiación solar
	Observatorio	PRE24	Precipitación en las últimas 24 horas
		PRELAMP	Precipitación en el periodo
		PRETPO	Periodo de muestreo para precipitación
		TEMMAX	Temperatura máxima
		TEMAMB	Temperatura ambiente
		TEMMIN	Temperatura mínima
		TEMROC	Temperatura de rocío
		PRSMAR	Presión al nivel del mar
		NUBOCT	Nubosidad (Octas)
		NUBBAJ	Altura de las nubes más bajas

Fuente: US-EPA (U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), 2024)

Debido a que resulta particularmente difícil obtener las mediciones de todos los parámetros anteriores, se hace necesario estimar los secundarios por medio de las formulaciones recomendadas en la literatura. La opción que se utilizó para este estudio fue el modelo regional de simulación atmosférica WRF (Weather Research and Forecast) que es desarrollado y mantenido por el NCAR (National Center for Atmospheric Research) con contribuciones de la comunidad científica internacional. El modelo WRF es altamente adaptable a diferentes zonas geográficas y aplicaciones, ya que cuenta con más de 280 parámetros de configuración.

Todos los cálculos de la simulación meteorológica WRF y ejecutados por MeteoSIM (MeteoSIM, 2025), cuenta con las siguientes especificaciones:

- Resolución espacial de 3 km (distancia horizontal entre puntos de grilla) para todo el territorio nacional.
- 28 niveles desde superficie hasta 50 mb con una densidad máxima en superficie.
- Simulación explícita de las nubes con 5 tipos de hidrometeoros (vapor, agua líquida, nieve, hielo y granizo suave).
- Simulación de la radiación de onda corta y larga separada por once y dieciséis bandas respectivamente.
- Capa límite según teoría de similitud de Monin - Obukhov.

6 ESCENARIOS DE MODELIZACIÓN

En la sección 4.4.1 de este estudio se identificaron las fuentes generadoras de contaminantes a la atmósfera, se clasificaron por tipo de fuente y posteriormente se definieron las tasas de emisión con base en la información aportada por el cliente, así como datos bibliográficos de estudios publicados. A continuación, se muestran las consideraciones realizadas para seleccionar los escenarios de modelación.

6.1 Definición de escenarios

Tras la estimación de las emisiones, se realizó un análisis que llevó a la determinación de los 3 días seleccionados (día de dispersión normal, día de peor dispersión y día de mejor dispersión). Para ello, y partiendo de los contaminantes con regulación normativa en materia de calidad del aire, se realizó una corrida preliminar del modelo AERMOD, con el fin de identificar el número de receptores que superaban los límites máximos permisibles diarios o que presentaban una mayor exposición. Este enfoque se ha adoptado con el fin de buscar la mayor prevención y conocimiento del impacto potencial del escenario accidental de incendio en el entorno.

La evaluación se efectuó para todos los días del período analizado, permitiendo identificar la fecha en la que se presentó el mayor número de receptores con elevadas concentraciones. El modelo incorporó las principales variables meteorológicas y físicas que influyen en la dispersión atmosférica, tales como la velocidad y dirección del viento, la estabilidad atmosférica, la geometría fuente-receptor, la altura de emisión y la topografía del terreno.

Con base en los resultados obtenidos en la corrida preliminar, se seleccionó:

- El 14 de junio de 2025 como el día con las condiciones más desfavorables para la dispersión atmosférica, al presentar el mayor promedio de nivel de concentración en todos los receptores.
- El 27 de enero de 2025 como el día con las condiciones más favorables para la dispersión atmosférica, al presentar el menor promedio de nivel de concentración en todos los receptores.
- El 02 de junio de 2025 como el día representativo de condiciones normales de dispersión atmosférica, al presentar un comportamiento intermedio respecto a los escenarios más favorables y desfavorables identificados durante el período de análisis.

6.2 Modelado de las fuentes de emisión y entorno

Con el fin de estimar el comportamiento de las emisiones generadas en los escenarios accidentales teóricos, se idealizaron las fuentes de emisión considerando la topografía, receptores de interés y

coordenadas en el sistema de referencia ETRS89 UTM Zona 30 Norte. Para la configuración de la instalación, y por tanto para la definición de las fuentes de emisión, se partió del plano de implantación definitivo del proyecto, complementado con información del diseño y cartografía del terreno aportado por el promotor.

En la Tabla 15 se presenta la información principal de las fuentes que se emplearon para alimentar al modelo.

Tabla 15. Idealización de las fuentes

Actividad	Tipo de Fuente	Comentarios
1. Fuentes de área		
1.1. Contenedor de batería	Área	Un único nivel

Fuente: Applus+ (estudio actual)

Los datos básicos sobre las fuentes incluyen:

- Localización de la fuente a través de sus coordenadas ETRS89 UTM Zona 30 Norte, X (Este) y Y (Norte).
- Alturas sobre el nivel del mar de la base de la fuente, es decir, la altura del terreno.
- Altura de la fuente sobre el nivel del terreno.

Para el modelamiento correspondiente al fluoruro de hidrógeno (HF) se implementó una configuración específica en el software AERMOD, particularmente en la configuración de la fuente de área. Esto se realizó con el fin de representar de forma más adecuada su comportamiento debido a que el fluoruro de hidrogeno es un compuesto altamente reactivo en la atmosfera, lo cual puede influir en su dispersión. Para ello se consideraron los parámetros reportados en la siguiente tabla.

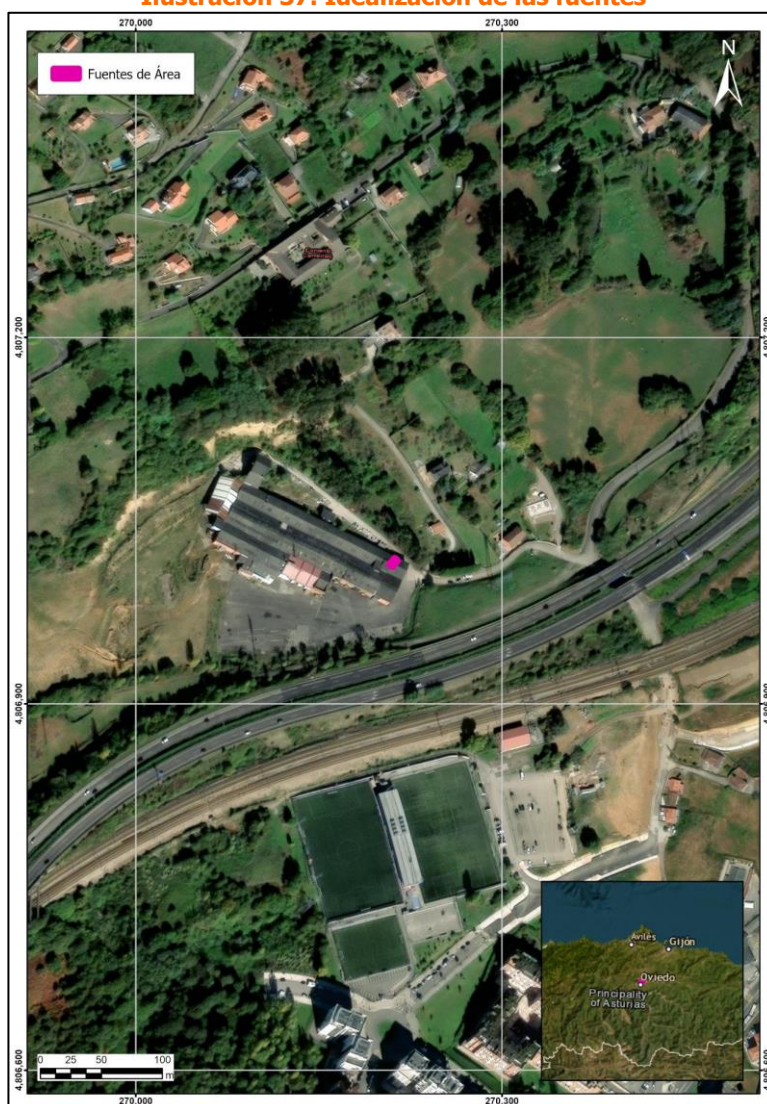
Tabla 16. Parámetros de deposición gaseosa en el fluoruro de hidrogeno (HF)

Parámetro	Valor	Unidades
Difusividad en aire	0,0503	cm ² /s
Difusividad en agua	7,7E-6	cm ² /s
Constante de Henry	0,969	Pa m ³ /mol
Resistencia cuticular	7,84	s/cm

Fuente: (Fuller, Schettler, & Giddings, 1966), (Wilke & Chang, 1955), (Sander, 2015), (Wesely, 1989)

En la ilustración 44 se presentan la fuente de área de emisión del proyecto, la cual corresponde al contenedor de batería bajo el evento accidental de un incendio y situado lo más próximo posible de un receptor sensible. En la Tabla 17 se recoge la información básica de la fuente de emisión.

Ilustración 37. Idealización de las fuentes



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

Tabla 17. Resumen fuentes de área

ID	Description	X coordinate	Y coordinate	Elevation	Emission rate	Release height	Init. vert. dim.
		m	m	meters	$g/(s \cdot m^2)$	meters	meters
2C01B	Contenedor de b	269931.7833	4806958.466	220.44	3.2664E-01	2.9	1.35

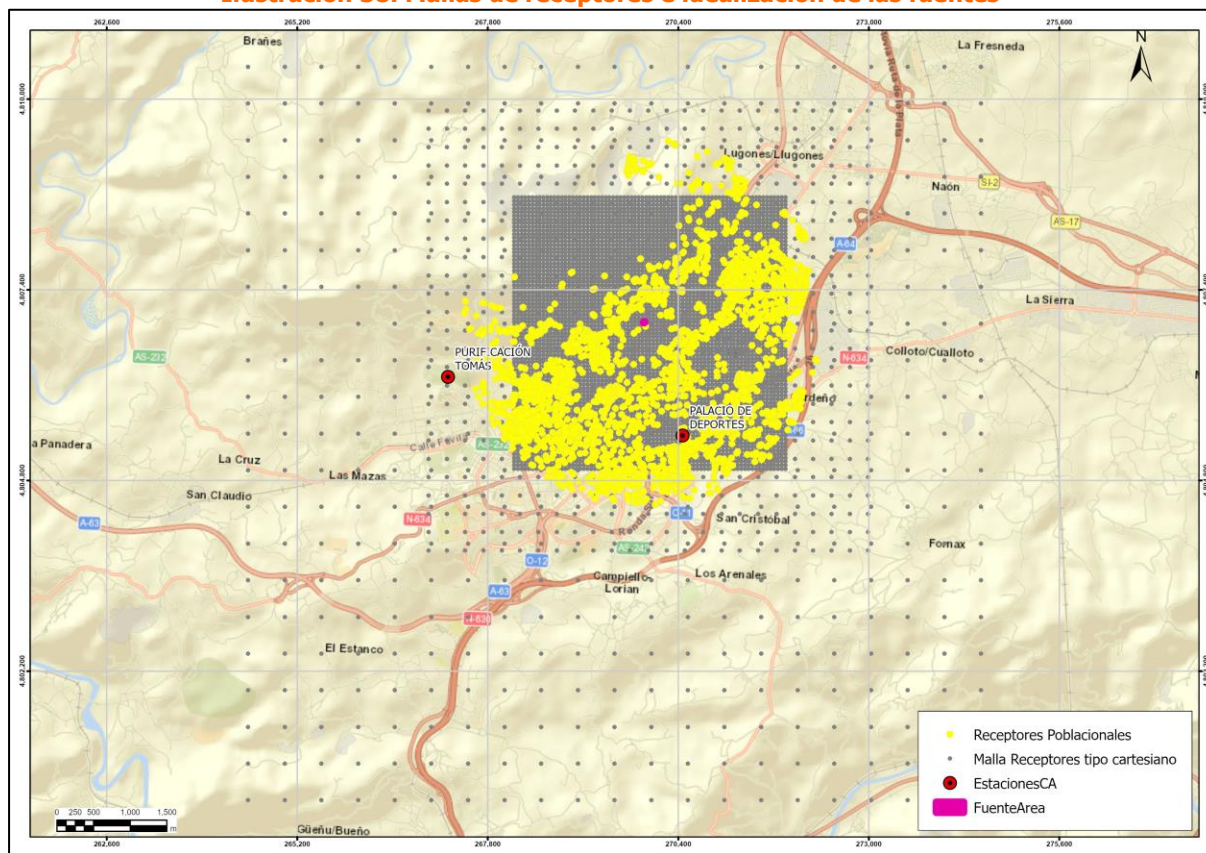
Fuente: Applus+ (estudio actual)

Nota: Todas las fuentes y configuraciones se pueden ver con mayor detalle en el Anexo 4 utilizando el software de simulación BREEZE AERMOD.

6.3 Resolución y definición del dominio

En el modelo se tuvieron en cuenta tres (3) mallas de receptores tipo cartesiano. La primera malla se encuentra proyectada a 3,7 km con un espaciado de 50 metros y una superficie de 14 km². La segunda malla está proyectada a 6 km con un espaciado de 250 metros y una superficie de 12 km². Finalmente, la tercera malla de 10 km con un espaciado de 500 m y una superficie de 100 km². En la ilustración 45 se pueden observar las mallas utilizadas y la idealización de las fuentes para la modelación.

Ilustración 38. Mallas de receptores e idealización de las fuentes

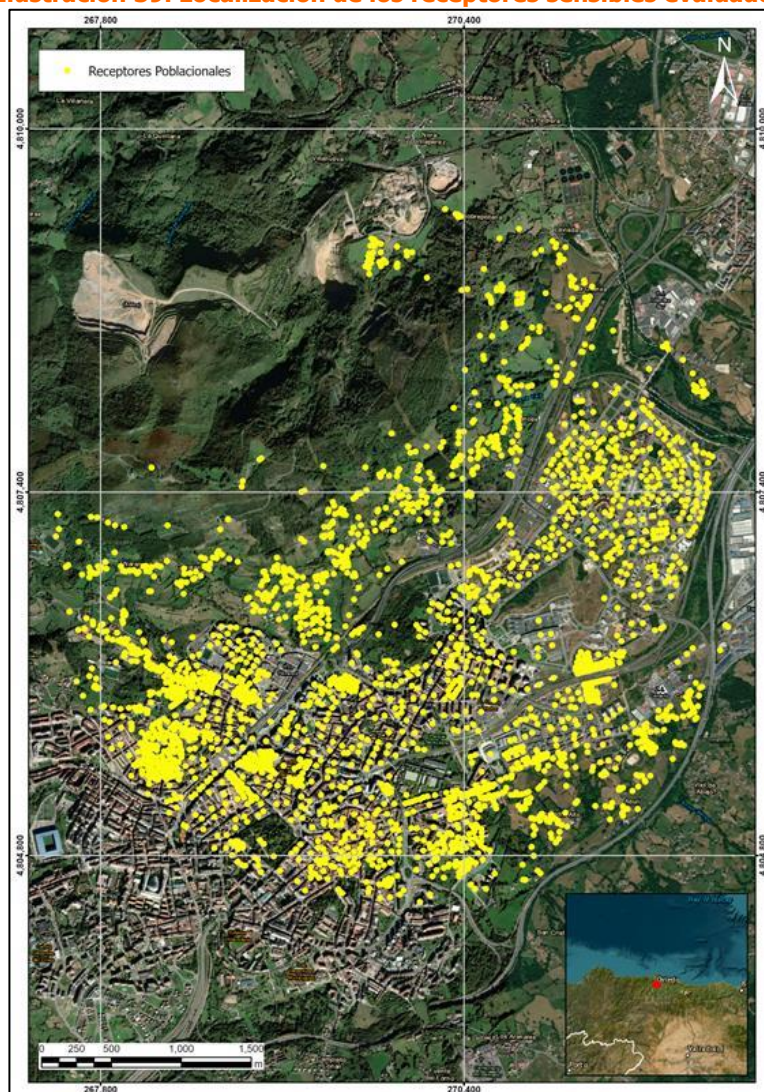


Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

Se tuvieron en cuenta dos mil seiscientos setenta y dos (2.672) puntos correspondientes a viviendas o espacios habitables que se encuentran ubicados en zonas cercanas al proyecto. En la Ilustración 39 se observan los receptores evaluados, así como en la Tabla 18 se visualiza su codificación dentro de la modelación.

La información relacionada con la topografía utilizada en el modelo se encuentra descrita en la sección 4.5 del presente estudio.

Ilustración 39. Localización de los receptores sensibles evaluados



Fuente: Elaboración propia Applus+ (estudio actual)

Tabla 18. Resumen ejemplo con receptores sensibles evaluados

ID	Description	X coordinate	Y coordinate	Elevation	Hill height scale	Flagpole height	Sensitive
		m	m	meters	meters	meters	
D3	Receptor poblac	267993.815	4806347.599	308.84	634.91	1.8	0
D4	Receptor poblac	268006.6476	4806838.581	355.41	634.91	1.8	0
D5	Receptor poblac	267500.9682	4807135.534	425.88	634.91	1.8	0
D6	Receptor poblac	268713.1387	4807207.354	461.67	634.91	1.8	0
D7	Receptor poblac	268128.8406	4806158.652	286.98	634.91	1.8	0
D8	Receptor poblac	268708.4792	4805376.438	229.24	634.91	1.8	0
D9	Receptor poblac	268719.7039	4805395.935	226.3	634.91	1.8	0
D10	Receptor poblac	268726.5371	4805390.421	226.23	634.91	1.8	0
D11	Receptor poblac	268768.5609	4805346.309	224.98	634.91	1.8	0
D12	Receptor poblac	268780.0156	4805334.091	224.79	634.91	1.8	0
D13	Receptor poblac	268772.2585	4806045.485	238.06	634.91	1.8	0
D14	Receptor poblac	268754.4902	4805947.951	231.87	634.91	1.8	0
D15	Receptor poblac	268736.6219	4805386.658	225.59	634.91	1.8	0
D16	Receptor poblac	268749.102	4805324.817	225.11	634.91	1.8	0
D17	Receptor poblac	268770.1817	4805311.645	224.93	634.91	1.8	0

Fuente: Applus+ (estudio actual)

Nota: Todos los receptores se pueden ver con mayor detalle en el Anexo 4 utilizando el software de simulación BREEZE AERMOD.

Los datos expuestos muestran como la ubicación seleccionada para la evaluación conlleva la existencia de multitud de receptores sensibles en el entorno próximo y en todo el dominio de simulación contemplado. Dada la gran diversidad de ubicaciones posibles para este tipo de proyectos, en suelo no urbanizable en Asturias, se ha preferido reforzar la seguridad en la valoración con este enfoque.

6.4 Resultados

El modelo AERMOD es un modelo refinado de dispersión atmosférica que se puede utilizar para evaluar la concentración de contaminantes emitidos desde diferentes tipos de fuentes. Este modelo simula el transporte y la dispersión atmosférica de contaminantes provenientes de fuentes puntuales, área y volumétricas. AERMOD utiliza datos meteorológicos horarios procesados secuencialmente con el objetivo de calcular los niveles de inmisión de contaminantes en aire para diferentes periodos de tiempo: promedio desde una hora hasta un año.

6.4.1 Archivos de entrada AERMOD

La implementación y corrida de modelación AERMOD requiere de información de entrada, la cual es descrita a continuación:

- a) Datos de las fuentes: tipo de fuente, ubicación, altura, áreas, volúmenes y elevación del terreno en donde están ubicadas las fuentes, así como la geometría de la fuente.
- b) Contaminantes a evaluar: se seleccionan los contaminantes de interés para el proyecto que corresponden a: monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}) y fluoruro de hidrógeno (HF).
- c) Datos del modelo digital de elevación: esta información describe la altimetría de una zona mediante un conjunto de datos acotados.
- d) Datos meteorológicos: Se requiere como datos de entrada las características de la superficie, incluyendo el parámetro de rugosidad de la superficie (z_0), la relación de Bowen y el albedo, así como datos horarios de velocidad y dirección del viento, entre otros. Dos archivos de entrada son producidos para modelación AERMOD, el archivo de superficie (.sfc) contiene las variables horarias calculadas, y el archivo de los perfiles (.pfl) que contiene los datos calculados en cada nivel de altura por modelación meteorológica WRF.
- e) Datos de los receptores: coordenadas, elevación, altura respecto de la superficie y la escala de la altura de las elevaciones del terreno que son generadas por el procesador de terreno para ingresar a AERMOD.
- f) Datos de emisión: se requiere como dato de entrada las emisiones calculadas en unidades de g/s de cada una de las fuentes idealizadas. Según la geometría de la fuente, el dato de emisión a incluir se determinará en g/s*m² o en unidades que dependerá de la elección de la forma espacial.

En el Anexo 4 "*Archivos de modelación*" se encuentran los archivos de entrada al modelo, que forman parte integral de este informe:

- Archivo de datos: ami.
- Archivo meteorológico: sfc, pfl.
- Archivo topográfico: tif.

6.4.2 Archivos de salida AERMOD

Los archivos de salida del modelo AERMOD incluyen la información de entrada, tablas resúmenes de las concentraciones más altas por receptor y para tiempos específicos promedios, tablas resúmenes de las concentraciones máximas y de los valores concurrentes por receptor para cada hora o día procesado.

El modelo se ejecutó para los siguientes resultados:

- Promedio de 24 horas: aporta información de los datos máximos para cada receptor. Aplica para el material particulado.

- Promedio de 1 hora: aporta información del dato más elevado para cada receptor, aplicable para el monóxido de carbono (CO), el fluoruro de hidrógeno (HF) y el hidrógeno (H₂).

El archivo con la información de salida se presenta en el Anexo 4 "Archivos de modelación" y Anexo 5 "Carpeta SIG" con la siguiente extensión:

- Archivos de datos: aml y amz.
- Archivos raster: tif.

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los análisis de los resultados para cada uno de los contaminantes evaluados en los diferentes escenarios. Además, se presentan las isopletras de cada uno de ellos donde de forma general se observa que las condiciones meteorológicas ejercen una influencia significativa sobre el comportamiento de la pluma de dispersión. **Los resultados muestran que las mayores concentraciones se localizan sobre el contenedor y en cercanía de la fuente de área modelada.** Este comportamiento puede estar asociado a dos factores:

- En primer lugar, a la diferencia de altura entre la malla de receptores (1,8 m) y la fuente de área (2,9 m). Como consecuencia de este desnivel, la pluma experimenta un ascenso inicial para posteriormente descender y mezclarse en la capa límite, lo que ocasiona que los máximos aportes se registren en zonas adyacentes a la fuente y no directamente en su ubicación exacta.
- En segundo lugar, a las condiciones meteorológicas propias de cada escenario, las cuales influyen en la dispersión de la pluma y desplazan los picos de concentración hacia áreas cercanas a la emisión.

En el peor día de dispersión, la velocidad promedio del viento es de aproximadamente 1,50 m/s, condición que favorece una menor dilución atmosférica y permite que la pluma permanezca más próxima a la fuente, generando una mayor acumulación en su entorno inmediato.

Por el contrario, en el mejor día de dispersión se registran velocidades de viento más altas, con un promedio aproximado de 7,85 m/s, lo cual favorece el transporte y la dilución de la pluma, reduciendo la permanencia de concentraciones elevadas en el área cercana al contenedor.

Finalmente, en el escenario de dispersión normal se presenta una condición intermedia, con una velocidad promedio del viento cercana a 2,96 m/s, superior a la del peor día, pero inferior a la del mejor escenario, lo que permite cierto transporte de la pluma, aunque las concentraciones más altas continúan localizándose cerca de la fuente modelada.

Expuesto el contexto anterior, se presentan los resultados de la modelación de dispersión (MD) de las emisiones de contaminantes con normativa en materia de calidad del aire enfocada en situaciones de emergencia. Los resultados obtenidos en la simulación para el Monóxido de carbono (CO) se evaluarán frente al límite AEGL-2, dado que no existe un valor regulado para el nivel AEGL-1; Por su parte, las concentraciones de Hidrógeno (H₂) se compararán con su límite inferior de explosividad (LEL), debido a su elevada inflamabilidad en el aire ambiente. Mientras que para el material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}), los resultados son comparados de modo indicativo con el Real Decreto 102/2011. Por último, los resultados del fluoruro de hidrógeno (HF), son comparados de modo indicativo con el valor límite del nivel AEGL-1 y AEGL-2.

7.1 Monóxido de carbono (CO)

Según los resultados del modelo, se observan diferencias importantes en función de las condiciones meteorológicas. Las concentraciones en los receptores sensibles en el máximo horario del monóxido de carbono bajo condiciones meteorológicas desfavorables se presentan en un rango de 0 a 0,92 mg/m³ (916,45 µg/m³). Con condiciones meteorológicas favorables para la dispersión, las concentraciones en los receptores no superan los 0,37 mg/m³ (373,24 µg/m³). En el escenario de condiciones normales de dispersión las concentraciones en los receptores no superan 0,69 mg/m³ (688,61 µg/m³). Al realizar

una comparación para el monóxido de carbono en el nivel AEGL-2, se observa que ningún receptor excede los valores de referencia establecidos ($95.035,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

A continuación, se presentan las curvas de isoconcentración, en el escenario de mejor dispersión, las concentraciones son muy bajas, en el escenario de dispersión normal las concentraciones continúan siendo bajas, aunque se observa una pluma dispersión alrededor de la fuente modelada. Mientras que para el escenario de peor dispersión se presenta concentraciones más elevadas que las presentadas en los escenarios anteriores, sin embargo, el incremento se mantiene alrededor de la fuente de emisión sin generar impactos significativos en la zona poblada.

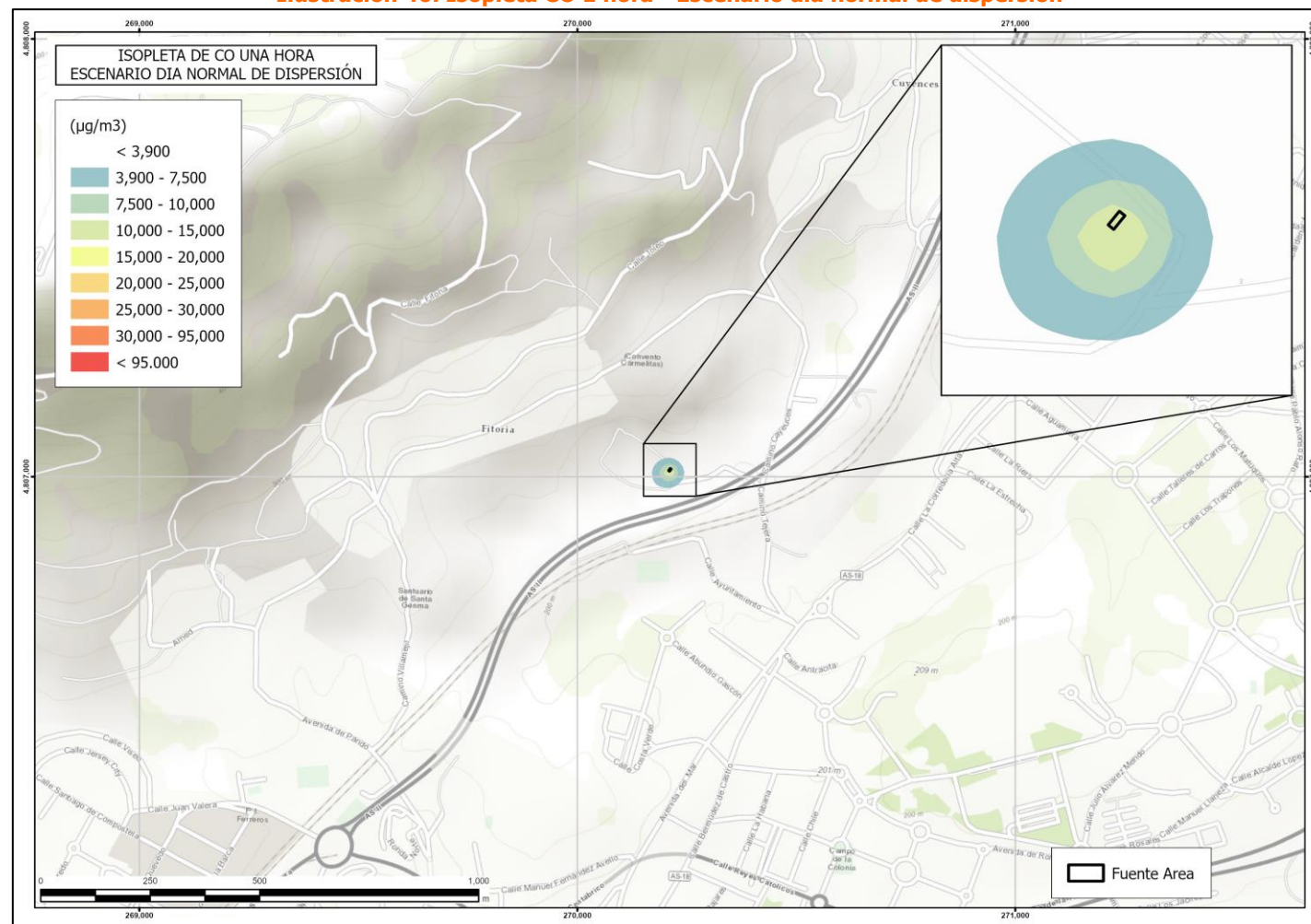
Es importante resaltar que el escenario desfavorable corresponde a una condición crítica, orientada a identificar el potencial máximo de impacto ante un posible evento accidental. Adicionalmente, la modelación no considera la implementación de sistemas de control, medidas de mitigación, protocolos de atención de emergencias ni acciones de extinción del incendio. Las medidas de prevención, respuesta temprana y control ante un eventual incendio en los contenedores de baterías reducirán la probabilidad y potencial impacto sobre la calidad del aire y los receptores poblacionales cercanos.

Modelización contaminante CO. Escenario de día normal de dispersión

En el escenario con condiciones normales, se observa que las mayores concentraciones se registran sobre la fuente de área y a una distancia de aproximadamente 20 metros alrededor de la misma, alcanzando valores entre 10 a 15 mg/m³ (10.000 a 15.000 µg/m³).

Hay una dispersión en sentido Sursuroeste (SSW), con una dirección que lleva a que la exposición de receptores sensibles sea con concentraciones que no superan los 3,90 mg/m³ (3.900 µg/m³). Estos resultados garantizan el cumplimiento de los niveles establecidos en el nivel AEGL-2.

Ilustración 40. Isopleta CO 1 hora - Escenario día normal de dispersión

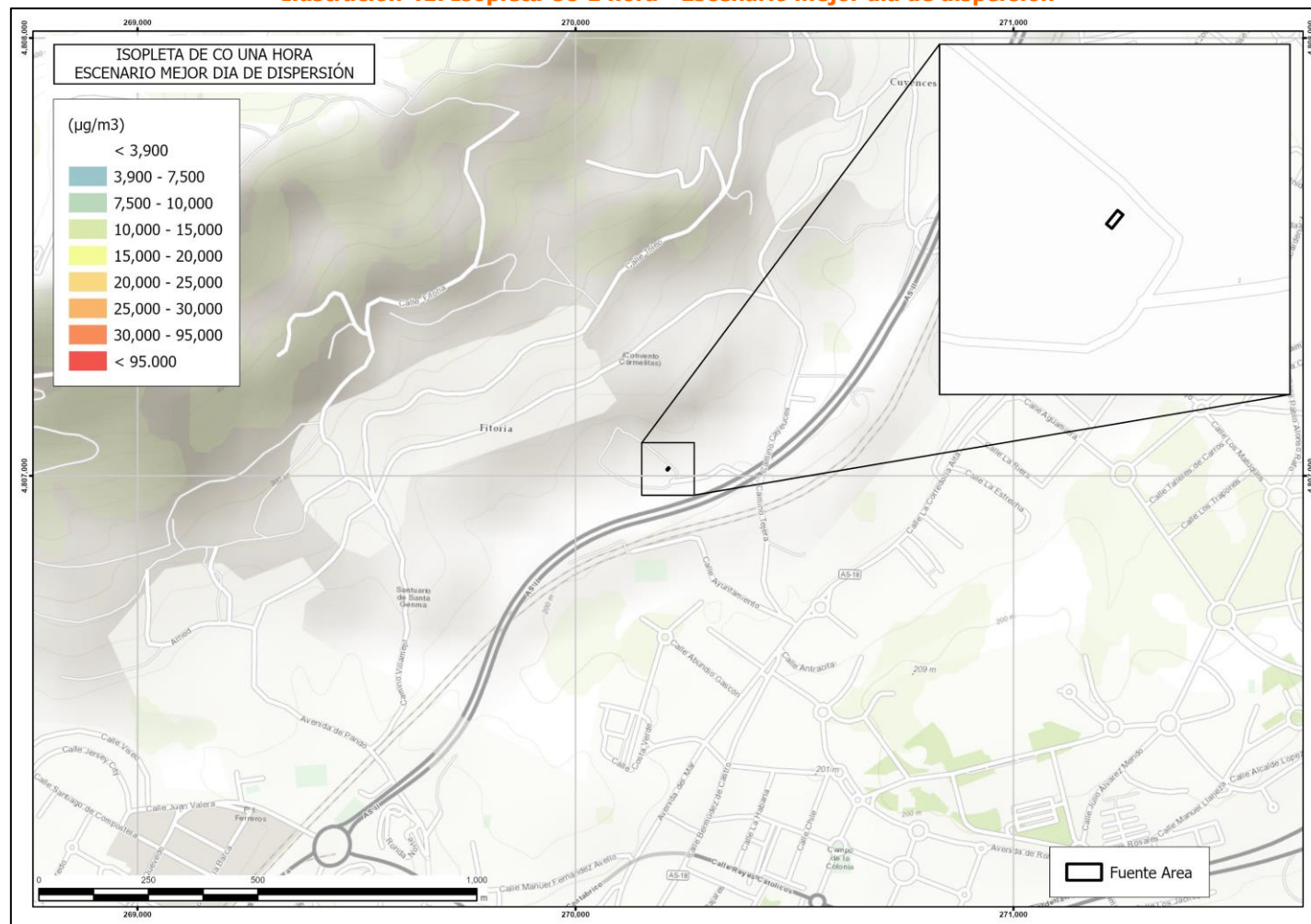


Modelización contaminante CO. Escenario de mejor día de dispersión

En el escenario con condiciones meteorológicas favorables se evidencia una reducción significativa en las concentraciones y extensión de la pluma de dispersión.

En este caso, las mayores concentraciones no superan los $3,90 \text{ mg/m}^3$ ($3.900 \text{ } \mu\text{g/m}^3$), sin presentar impactos en los receptores de interés. Estos resultados garantizan el cumplimiento de los niveles establecidos en el nivel AEGL-2.

Ilustración 41. Isopleta CO 1 hora - Escenario mejor día de dispersión



Fuente: Applus (Estudio actual)

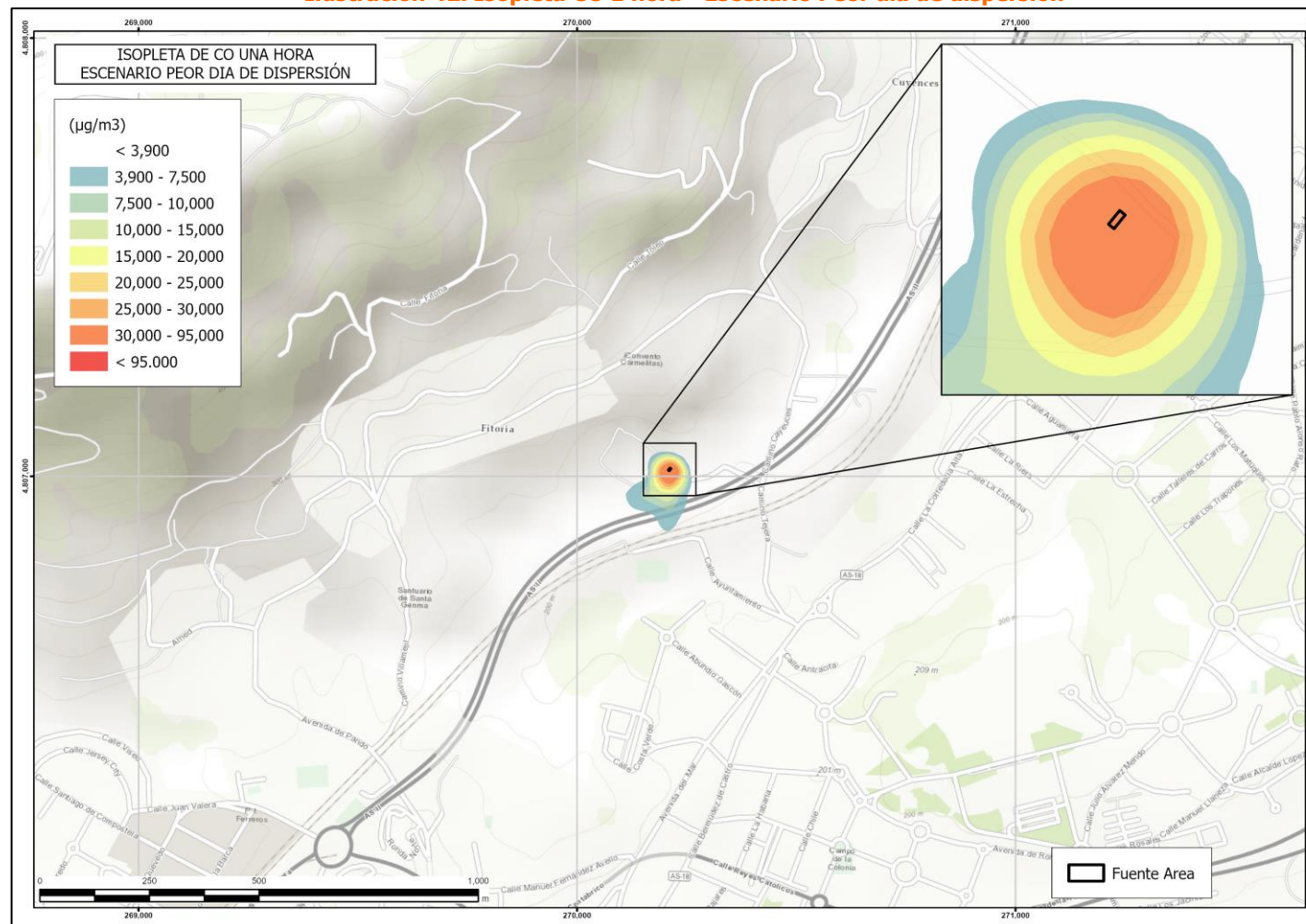
Modelización contaminante CO. Escenario de peor día de dispersión

En el escenario más desfavorable se observa que los valores de concentración entorno al escenario accidental son más altos. La dispersión se presenta en sentido Sursuroeste (SSW) sin generar impacto en la zona con mayor presencia de población.

A una distancia de aproximadamente 140 metros de la fuente, se presentan concentraciones entre 3,9 a 7,5 mg/m³ (3.900 a 7.500 µg/m³). Mientras que las mayores concentraciones se presentan sobre la fuente de área y alrededor de la misma a una distancia aproximada de 32 metros, en un rango de 30 a 95 mg/m³ (30.000 a 95.000 µg/m³).

Las concentraciones en los receptores sensibles no superan los 3,90 mg/m³ (3.900 µg/m³). Estos resultados garantizan el cumplimiento de los niveles establecidos en el nivel AEGL-2.

Ilustración 42. Isopleta CO 1 hora - Escenario Peor día de dispersión



Fuente: Applus (Estudio actual)

7.2 Hidrógeno (H₂)

Según los resultados obtenidos en los receptores poblacionales considerados en el modelo, las concentraciones horarias del hidrógeno bajo condiciones meteorológicas desfavorables se presentan en un rango de 0 a 0,26 mg/m³ (261,84 µg/m³), mientras que el escenario con condiciones favorables se presenta en un rango de 0 a 0,11 mg/m³ (106,64 µg/m³). En el día con condiciones normales de dispersión las concentraciones no exceden los 0,20 mg/m³ (196,75 µg/m³).

Al comparar las concentraciones del modelo para H₂ con el valor límite de 3.298 mg/m³ (3.298.000 µg/m³) correspondiente al Límite Inferior de Explosividad (LEL), se evidencia que no se presentan excedencias en ninguno de los receptores de los escenarios modelados.

A continuación, se presentan las curvas de isoconcentración, en el escenario de mejor dispersión, las concentraciones son muy bajas, en el escenario de dispersión normal las concentraciones continúan siendo bajas, aunque se observa una pluma dispersión alrededor de la fuente modelada. Mientras que para el escenario de peor dispersión se presenta concentraciones más elevadas que las presentadas en los escenarios anteriores, sin embargo, el incremento se mantiene alrededor de la fuente de emisión sin generar impactos significativos en la zona poblada.

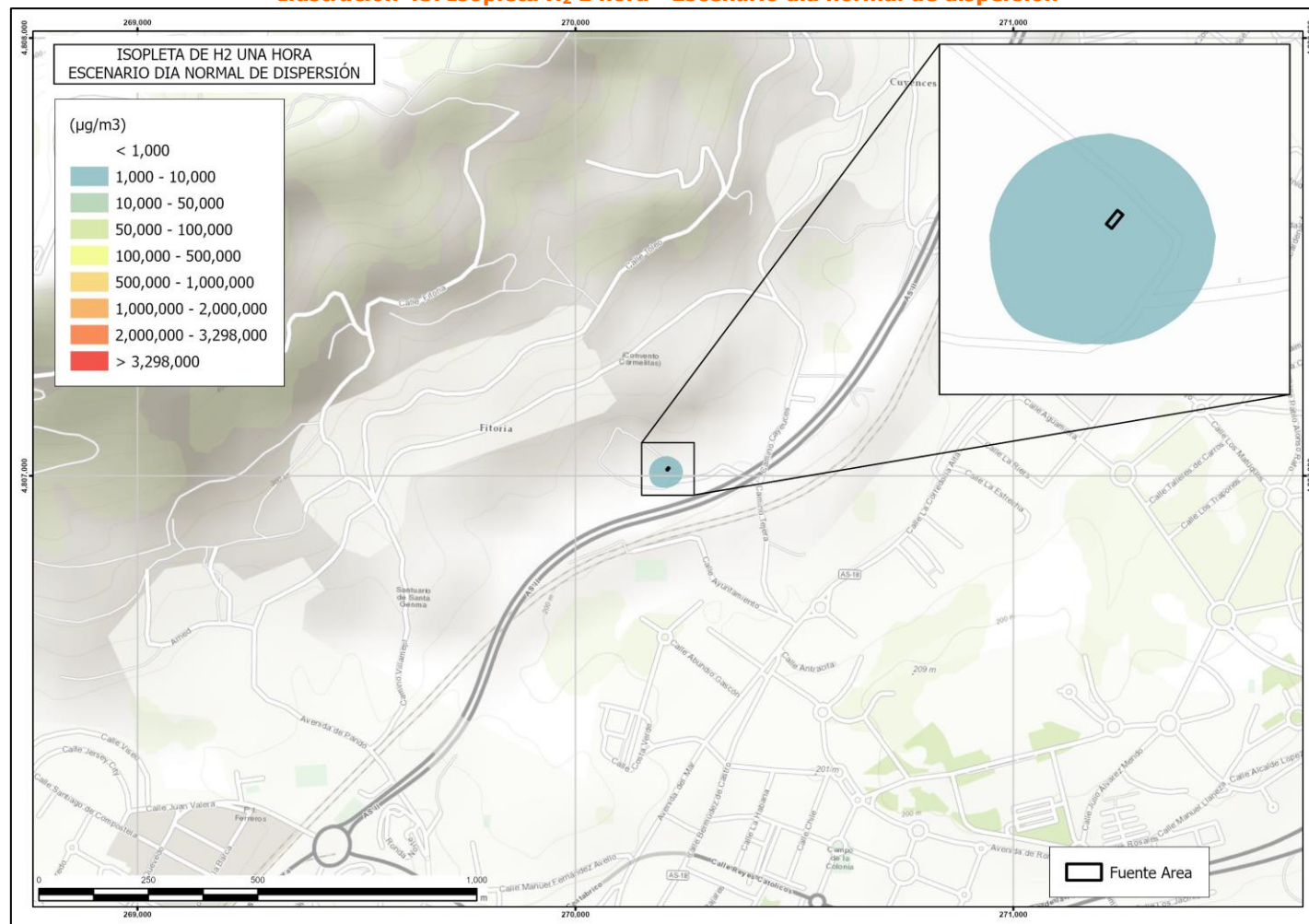
Es importante resaltar que el escenario desfavorable corresponde a una condición crítica, orientada a identificar el potencial máximo de impacto ante un posible evento accidental. Adicionalmente, la modelación no considera la implementación de sistemas de control, medidas de mitigación, protocolos de atención de emergencias ni acciones de extinción del incendio. Las medidas de prevención, respuesta temprana y control ante un eventual incendio en los contenedores de baterías reducirán la probabilidad y potencial impacto sobre la calidad del aire y los receptores poblacionales cercanos.

Modelización contaminante H₂. Escenario de día normal de dispersión

En el escenario con condiciones normales, se observa que las mayores concentraciones se registran sobre la fuente de área y alrededor de la misma a una distancia aproximada de 55 metros, alcanzando valores entre 1 a 10 mg/m³ (1.000 a 10.000 µg/m³).

Hay una dispersión en sentido Sursuroeste (SSW), con una dirección que lleva a que la exposición de receptores sensibles sea con concentraciones que no superan 1 mg/m^3 ($1.000 \text{ }\mu\text{g/m}^3$). Estos resultados garantizan el cumplimiento de los niveles establecidos en el nivel LEL.

Ilustración 43. Isopleta H₂ 1 hora - Escenario día normal de dispersión



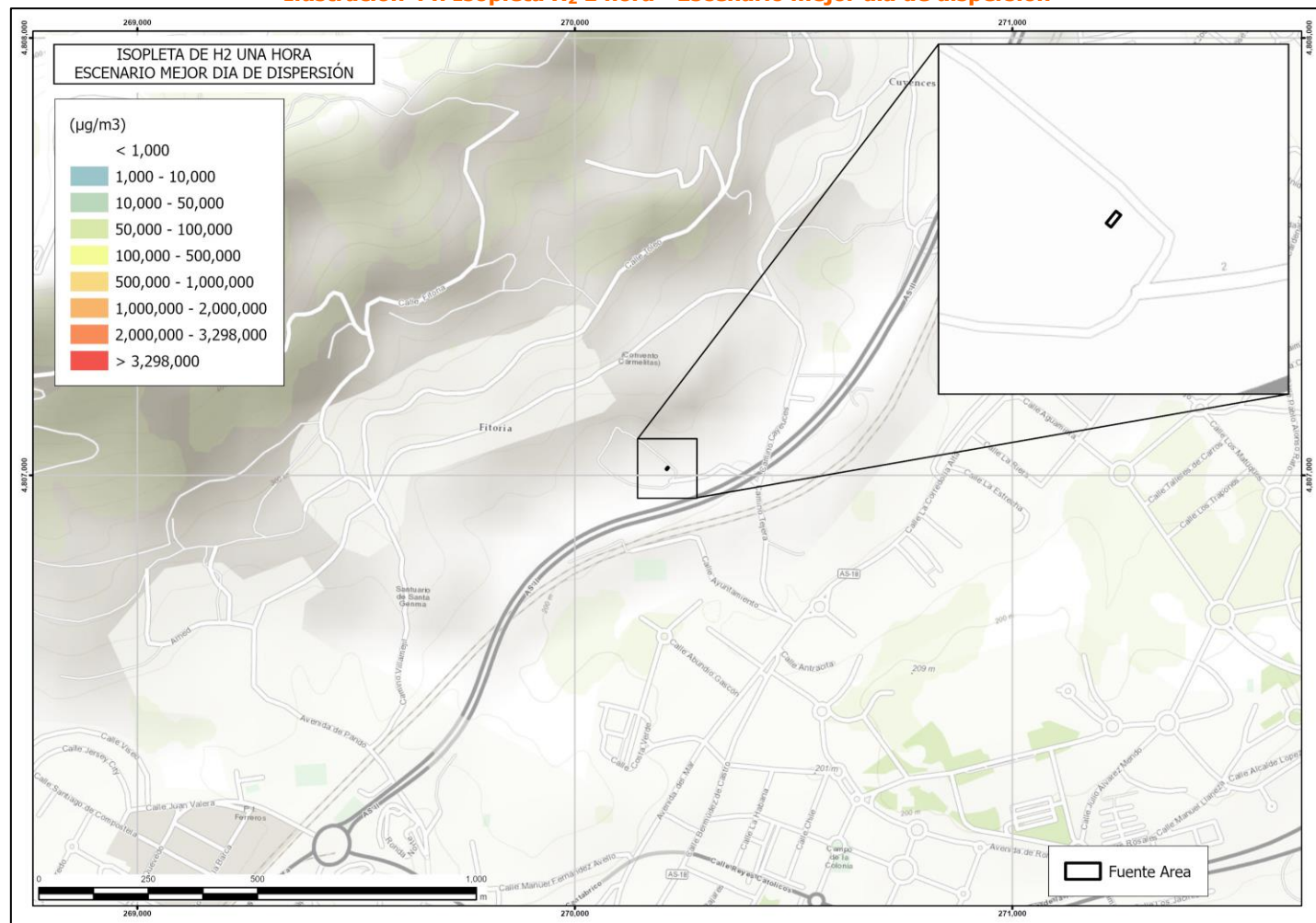
Fuente: Applus (Estudio actual)

Modelización contaminante H₂. Escenario de mejor día de dispersión

En el escenario con condiciones meteorológicas favorables se evidencia una reducción significativa en las concentraciones y extensión de la pluma de dispersión.

En este caso, las mayores concentraciones no superan 1 mg/m³ (1.000 µg/m³), sin presentar impactos en los receptores de interés. Estos resultados garantizan el cumplimiento de los niveles establecidos en el nivel LEL.

Ilustración 44. Isopleta H₂ 1 hora - Escenario mejor día de dispersión



Fuente: Applus (Estudio actual)

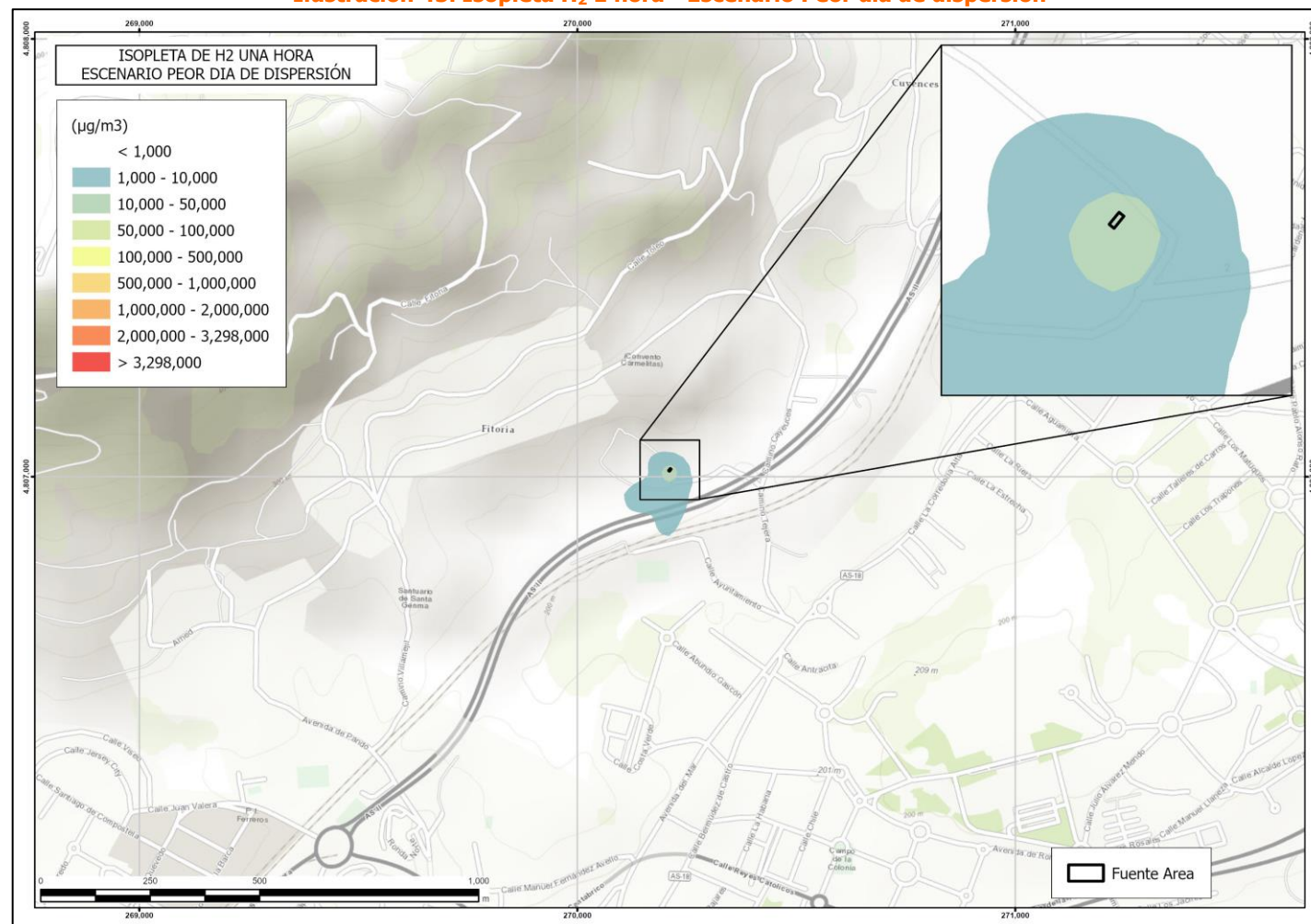
Modelización contaminante H₂. Escenario de peor día de dispersión

En el escenario más desfavorable se observa que los valores de concentración entorno al escenario accidental son más altos. La dispersión se presenta en sentido Sursuroeste (SSW) sin generar impacto en la zona con mayor presencia de población.

A una distancia de aproximadamente 150 metros de la fuente, se presentan concentraciones entre 1 a 10 mg/m³ (1.000 a 10.000 µg/m³). Mientras que las mayores concentraciones se presentan sobre la fuente de área y alrededor de la misma a aproximadamente 30 metros, en un rango de 10 a 50 mg/m³ (10.000 a 50.000 µg/m³).

Las concentraciones en los receptores sensibles no superan 1 mg/m³ (1.000 µg/m³). Estos resultados garantizan el cumplimiento de los niveles establecidos en el nivel LEL.

Ilustración 45. Isopleta H₂ 1 hora - Escenario Peor día de dispersión



Fuente: Applus (Estudio actual)

7.3 Material particulado (PM_{10} y $PM_{2,5}$)

Para modelizar este contaminante se ha asumido que las concentraciones de partículas se corresponden en su totalidad a cada una de las 2 fracciones (PM_{10} y $PM_{2,5}$), caso irreal y claramente desfavorable. A pesar de ello el modelo arroja unos resultados muy alejados del valor límite legislado para el contaminante PM_{10} . Para $PM_{2,5}$, considerando que el Real Decreto 102/2011 no establece un valor límite diario, se adopta como criterio de referencia el valor límite de umbral de protección a la salud de $25 \mu g/m^3$, valor que tampoco se alcanza en ninguno de los tres (3) escenarios.

De acuerdo con los resultados del modelo, se observan diferencias entre los tres (3) escenarios, aunque en ninguno de los casos, tal y como se ha indicado, se alcanza el valor de referencia fijado por el Real Decreto 102/2011 de $50 \mu g/m^3$ para el contaminante PM_{10} ni el umbral de activación de $25 \mu g/m^3$ para $PM_{2,5}$. Las concentraciones diarias de material particulado en los receptores bajo condiciones meteorológicas desfavorables presentan un rango entre 0 y $0,05 \mu g/m^3$. Por su parte, para el escenario con condiciones meteorológicas favorables, las concentraciones estimadas en los receptores son inferiores a $0,12 \mu g/m^3$. En el escenario de condiciones normales de dispersión las concentraciones en receptores no superan los $0,06 \mu g/m^3$.

A continuación, se presentan las curvas de isoconcentraciones obtenidas para cada uno de los escenarios, con un análisis específico de sus resultados. En términos generales se puede concluir, a la vista de los resultados que arroja el modelo que, el contaminante de material particulado con las tasas considerados tendrá una dispersión muy limitada y no alcanzará concentraciones de riesgo, quedando en todo caso muy alejado de los valores límite legislados en materia de calidad del aire.

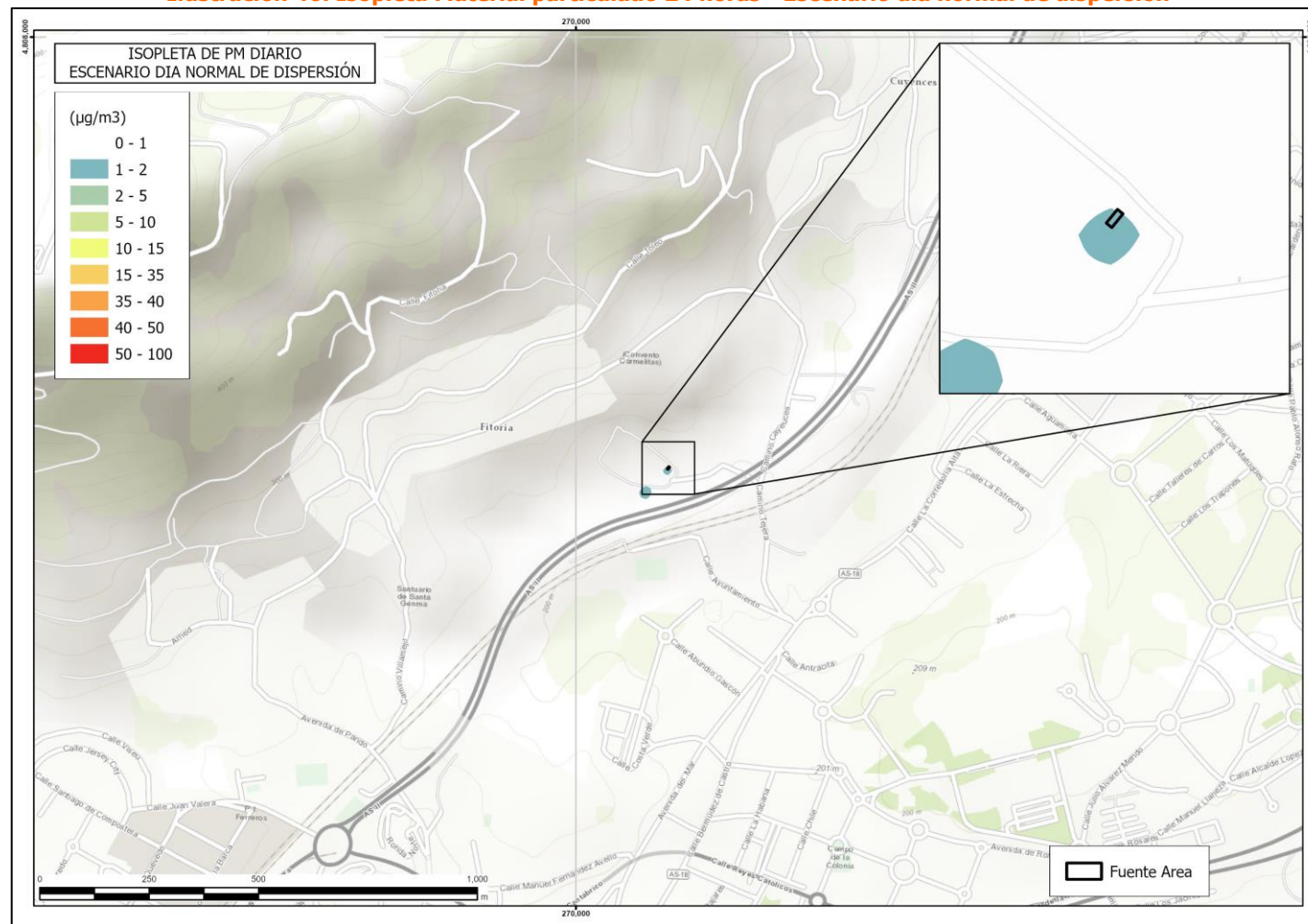
Modelización contaminante material particulado. Escenario de día normal de dispersión

En el escenario con condiciones normales se observan que las concentraciones no llegan a estar por encima de $0,002 \text{ mg/m}^3$ ($2 \mu\text{g/m}^3$). A pesar de que se ha asumido que las concentraciones de partículas se correspondan en su totalidad a PM_{10} , caso irreal y claramente desfavorable, los resultados del modelo, quedan muy alejados del valor límite legislado por el RD 102/2011, de 28 de enero.

Esta misma situación se alcanzaría si supusiésemos que el cien por cien del material particulado corresponde a $\text{PM}_{2,5}$.

Las concentraciones máximas simuladas se ubican sobre el contenedor y en la proximidad de la fuente de área a una distancia aproximada de 90 metros, debido al desnivel de altura entre la fuente (2,9 m) y la malla de receptores (1,8 m) que genera el ascenso inicial y posterior descenso de la pluma, así como a la influencia meteorológica del escenario.

Ilustración 46. Isopleta Material particulado 24 horas - Escenario día normal de dispersión



Fuente: Applus (Estudio actual)

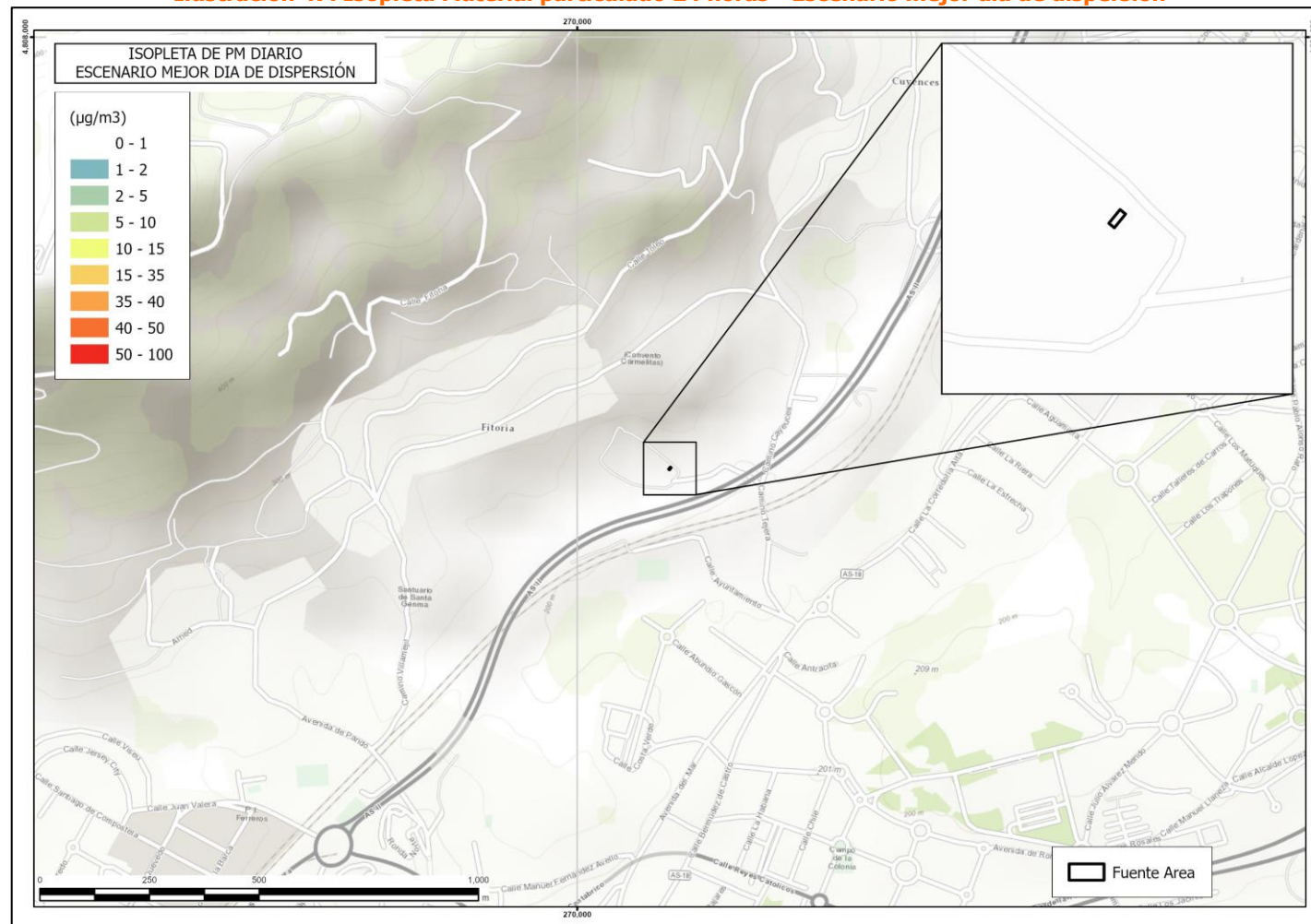
Modelización contaminante material particulado. Escenario de mejor día de dispersión

En el escenario con condiciones meteorológicas favorables, y de acuerdo con los resultados arrojados por el modelo, la emisión de partículas no es significativa.

Las concentraciones estimadas en el entorno son inferiores a 0,001 mg/m³ (1 µg/m³), muy alejadas del valor límite legislado por el RD 102/2011, de 28 de enero.

Esta misma situación se alcanzaría si supusiésemos que el cien por cien del material particulado corresponde a PM_{2,5}, al estar el valor de referencia anual en 25 µg/m³.

Ilustración 47. Isopleta Material particulado 24 horas - Escenario mejor día de dispersión



Fuente: Applus (Estudio actual)

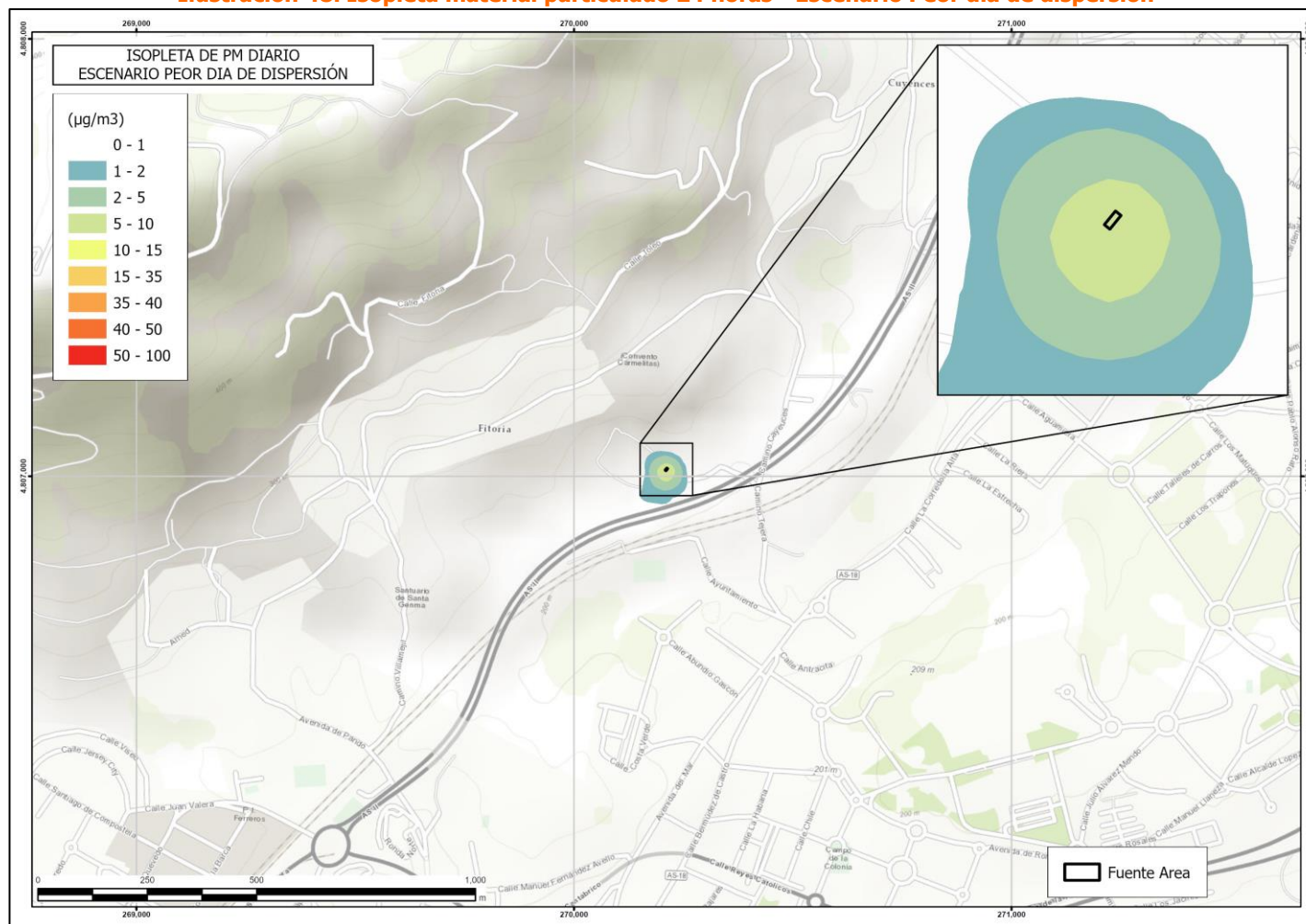
Modelización contaminante material particulado. Escenario de peor día de dispersión

En el escenario más desfavorable se observa que los valores de concentración entorno al escenario accidental son más altos. La dispersión se presenta en sentido Sursuroeste (SSW) sin generar impacto en la zona con mayor presencia de población.

A una distancia de aproximadamente 100 metros de la fuente, se presentan concentraciones entre 0,001 a 0,002 mg/m³ (1 a 2 µg/m³). Mientras que las mayores concentraciones se presentan sobre la fuente de área y alrededor de la misma a una distancia aproximada de 35 metros, en un rango de 0,005 a 0,01 mg/m³ (5 a 10 µg/m³).

Como en los otros dos (2) escenarios, a pesar de que se ha asumido que las concentraciones de partículas se correspondan en su totalidad a la fracción PM₁₀ o PM_{2,5}, caso irreal y claramente desfavorable, los resultados del modelo, quedan muy alejados del valor límite legislado.

Ilustración 48. Isopleta material particulado 24 horas - Escenario Peor día de dispersión



Fuente: Applus (Estudio actual)

7.4 Fluoruro de hidrógeno (HF)

De acuerdo con los resultados de la modelación, las mayores concentraciones en los receptores sensibles se presentan bajo las condiciones correspondientes al peor día de dispersión. En este escenario, las concentraciones horarias en los receptores alcanzan valores de hasta 0,90 mg/m³ (901,80 µg/m³). Por su parte, durante el mejor día de dispersión, las concentraciones en los receptores disminuyen significativamente, registrando valores máximos de 0,37 mg/m³ (367,32 µg/m³) para el periodo horario. Finalmente, para el escenario de dispersión normal, las concentraciones máximas en los receptores alcanzan 0,68 mg/m³ (677,09 µg/m³).

Al comparar las concentraciones modeladas de fluoruro de hidrógeno (HF) con los valores límite de referencia establecidos por los AEGL (*Acute Exposure Guideline Levels*), se identificó que, tomando como criterio el nivel de severidad AEGL-1, se presentan concentraciones superiores al valor de referencia 0,82 mg/m³ (820 µg/m³), en el escenario de peor dispersión. En el escenario de peor dispersión, la pluma de dispersión alcanza una distancia aproximada de 1.6 km desde la fuente de área, zona en la cual se identifican concentraciones superiores al valor de referencia AEGL-1.

Sin embargo, al realizar la comparación con el nivel AEGL-2, cuyo valor de referencia corresponde a 19,68 mg/m³ (19.680 µg/m³), no se evidencian excedencias en ninguno de los escenarios evaluados. El AEGL-2 corresponde a un nivel de exposición aguda a partir del cual la población general, incluyendo individuos susceptibles, podría experimentar efectos adversos irreversibles, graves o de larga duración, o una disminución en la capacidad de escapar de la exposición. Lo anterior indica que, si bien bajo el criterio AEGL-1 se presentan superaciones asociadas a posibles efectos leves o transitorios, las concentraciones modeladas no alcanzan los niveles asociados al umbral AEGL-2, descartando la aparición de afectaciones más severas que una molestia temporal.

La modelación asume que el **contenedor de baterías se ve involucrado en un incendio de desarrollo completo y que la emisión del contaminante se mantiene de forma continua durante toda la duración del evento**, considerando, de manera conservadora, la combustión total del sistema de 3.328 celdas de batería. Por tanto, si bien este enfoque tiene como objetivo evaluar un escenario de máxima exposición, la probabilidad de ocurrencia es mínima.

De igual forma, el modelo no considera las reacciones químicas que pueden reducir la concentración de HF en fase gaseosa durante el incendio, tales como su reacción con el aluminio, los compuestos de litio y otros materiales presentes en las baterías, procesos que favorecen la formación de compuestos sólidos como fluoruros de aluminio y litio.

Asimismo, la modelación no contempla la implementación de sistemas de control, medidas de mitigación, protocolos de atención de emergencias ni acciones de extinción del incendio. Las medidas de prevención, respuesta temprana y control ante un eventual incendio en los contenedores de baterías reducirán la probabilidad y potencial impacto sobre la calidad del aire y los receptores poblacionales cercanos.

A continuación, se presentan las isopletras obtenidas para cada uno de los escenarios de dispersión modelados. En términos generales, se observa que los escenarios correspondientes al peor día de dispersión y al día con condiciones normales de dispersión presentan concentraciones hacia el sector Oesuroeste (WSW), Suroeste (SW) y Sursuroeste (SSW) del área de estudio, asimismo, las mayores concentraciones se presentan en las zonas más próximas a la fuente de área. Para el escenario correspondiente al día de mejor dispersión, se evidencia una reducción significativa tanto en las concentraciones modeladas como en la extensión de la pluma de dispersión.

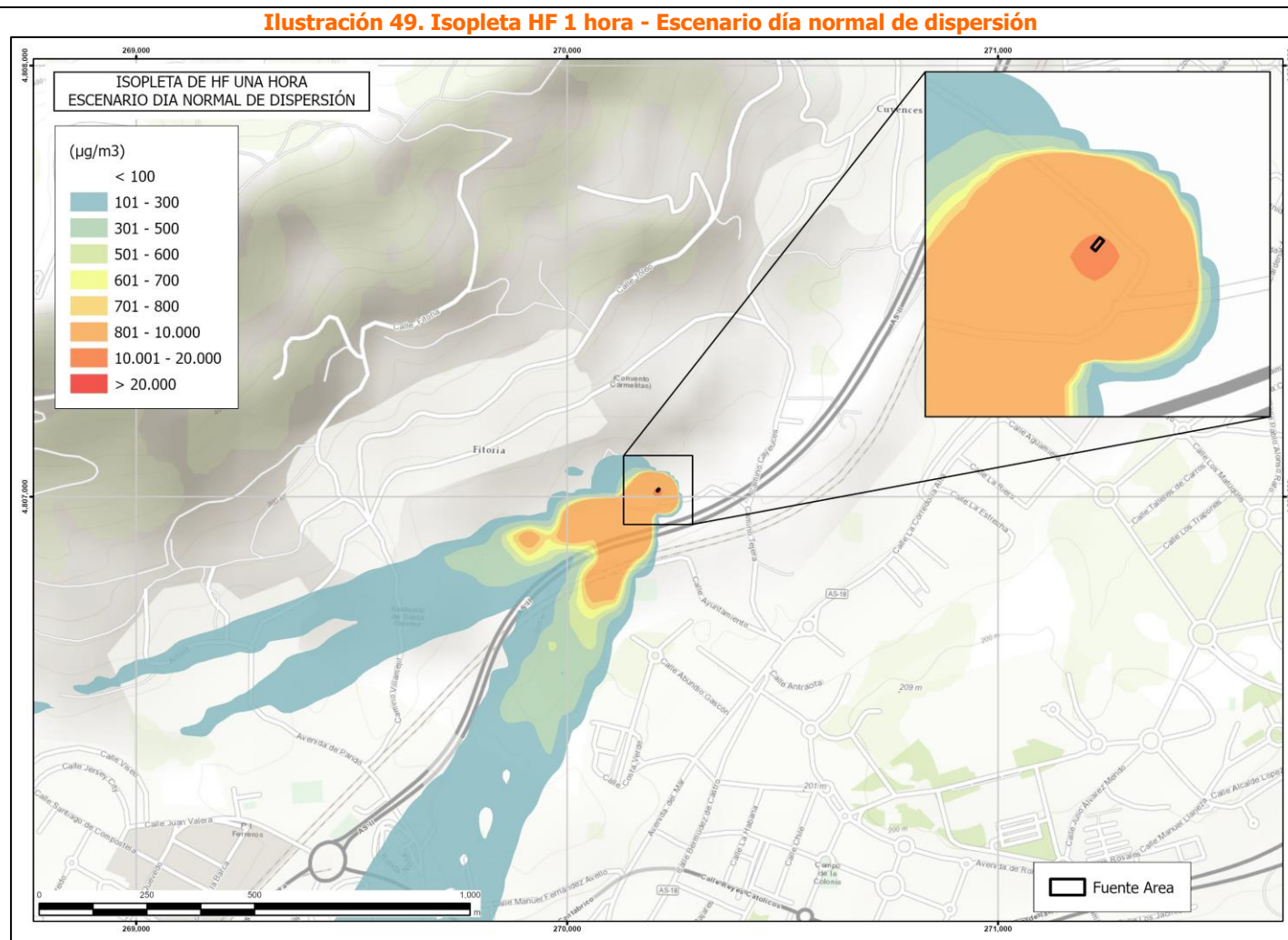
**Modelización contaminante HF.
Escenario de día normal de dispersión**

Se observa que la pluma se desplaza predominantemente hacia los sectores Oesuroeste (WSW) y Sursuroeste (SSW). A una distancia de aproximadamente 300 metros de la fuente, se presentan concentraciones en un rango entre 0.80 a 10 mg/m³ (801 a 10.000 µg/m³) sin alcanzar dichos niveles en ningún receptor poblacional.

Las mayores concentraciones se presentan en las inmediaciones de la fuente modelada con concentraciones que alcanzan a estar en un rango entre 10 a 20 mg/m³ (10.001 a 20.000 µg/m³) aproximadamente a 25 metros de la fuente. Estos resultados garantizan el cumplimiento de los niveles establecidos en el nivel AEGL-1.

Las concentraciones máximas simuladas se ubican en la proximidad de la fuente de área y sobre el contenedor, debido al desnivel de altura entre la fuente (2,9 m) y la malla de receptores (1,8 m) que genera el ascenso inicial y posterior descenso de la pluma, así como a la influencia meteorológica del escenario.

Ilustración 49. Isopleta HF 1 hora - Escenario día normal de dispersión



Fuente: Applus (Estudio actual)

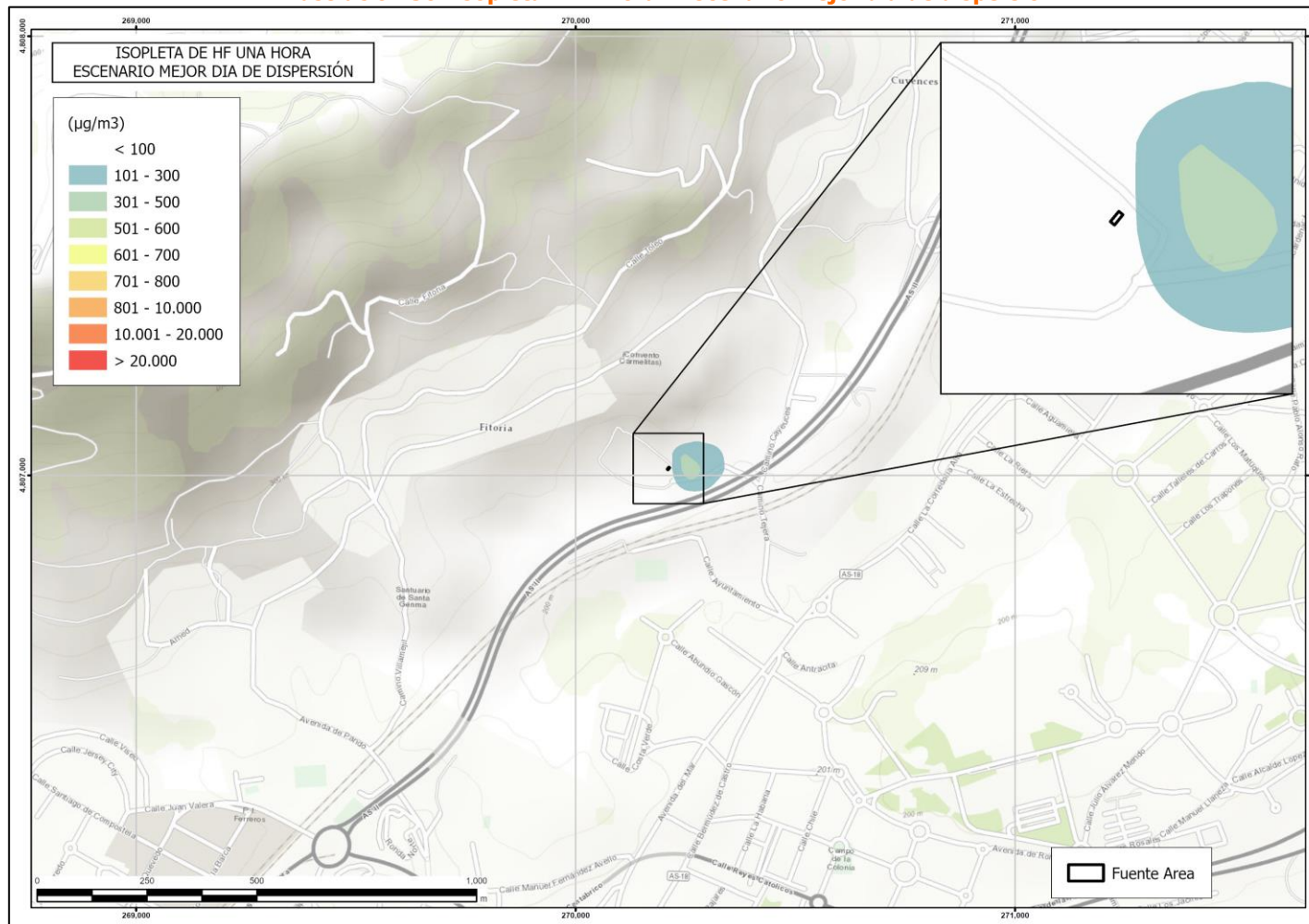
Modelización contaminante HF. Escenario mejor día de dispersión

Se observa una disminución significativa de las concentraciones y de la pluma de dispersión.

En este escenario la dispersión ocurre en sentido Este (E) y las mayores concentraciones se presentan cerca a la fuente modelada en un rango de 0,30 a 0.50 mg/m³ (301 a 500 µg/m³). Estos resultados garantizan el cumplimiento de los niveles establecidos en el nivel AEGL-1.

Las concentraciones máximas simuladas se ubican en la proximidad de la fuente de área y no sobre el contenedor, debido al desnivel de altura entre la fuente (2,9 m) y la malla de receptores (1,8 m) que genera el ascenso inicial y posterior descenso de la pluma, así como a la influencia meteorológica del escenario.

Ilustración 50. Isolepta HF 1 hora - Escenario mejor día de dispersión



Fuente: Applus (Estudio actual)

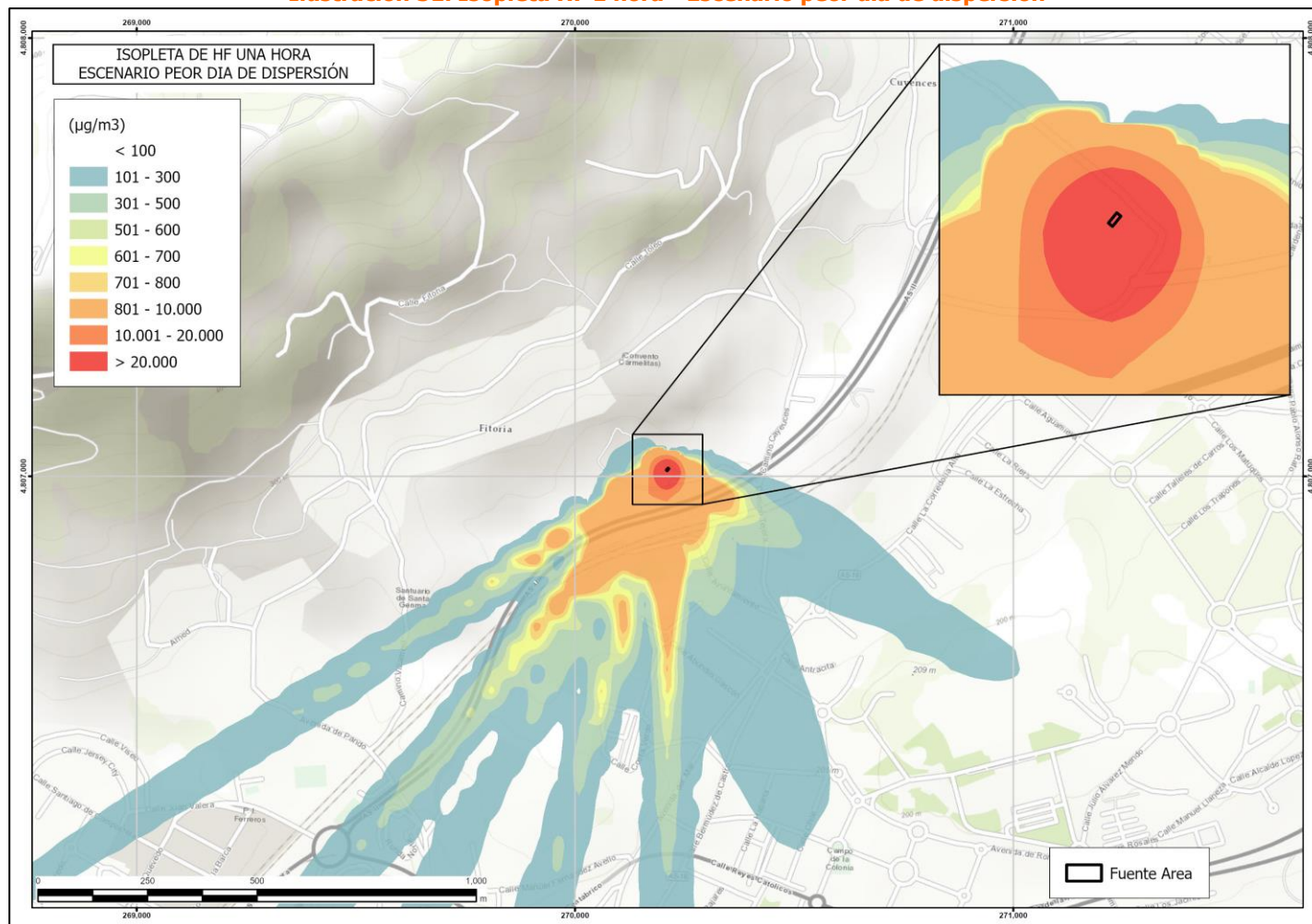
Modelización contaminante HF - horario- Escenario peor día de dispersión

Se observa que la pluma se dispersa principalmente en los sectores Oesuroeste (WSW), Suroeste (SW) y Sursuroeste (SSW) del área. A una distancia de aproximadamente 480 metros de la fuente, se presentan concentraciones en un rango entre 0.80 a 10 mg/m³ (801 a 10.000 µg/m³) alcanzando en un receptor poblacional el valor de 0,90 mg/m³ (901,80 µg/m³).

Las mayores concentraciones se presentan en las inmediaciones de la fuente modelada con concentraciones que alcanzan a ser superiores a 20 mg/m³ (20.000 µg/m³) aproximadamente a 50 metros de la fuente.

Las concentraciones máximas simuladas se ubican en la proximidad de la fuente de área y no sobre el contenedor, debido al desnivel de altura entre la fuente (2,9 m) y la malla de receptores (1,8 m) que genera el ascenso inicial y posterior descenso de la pluma, así como a la influencia meteorológica del escenario.

Ilustración 51. Isopleta HF 1 hora - Escenario peor día de dispersión



Fuente: Applus (Estudio actual)

8 VALIDACIÓN E INCERTIDUMBRE DEL MODELO

El modelo de dispersión de contaminantes es una herramienta que permite obtener la proyección de un contaminante en el ambiente y su exactitud depende de la forma en que se toman los datos, así como se introducen al software de modelación; su calibración es determinante para ajustar los valores medidos directamente en campo con los resultantes de la simulación y así obtener la máxima igualdad entre ambos, su comparación permite establecer el error probable, el cual se tiene como punto de partida para analizar los factores que pueden incidir en la diferencia entre estos.

Los factores que afectan en mayor grado la precisión de los modelos son: el modelo matemático en sí y la calidad de los datos de entrada.

En los modelos de dispersión se interacciona con dos tipos de variables:

- i) aquellas variables conocidas que pueden ser medidas, como son velocidad y dirección del viento, temperatura, altura de mezcla, factores de emisión, características de receptores y fuentes, entre otros,
- ii) aquella que no son medibles, por ejemplo, algunos detalles no resueltos del flujo atmosférico en condiciones convectivas.

Al ejecutar el modelo, que es una idealización de la realidad, estas variables desconocidas generan la pérdida de precisión en las concentraciones de contaminantes finales.

Estos errores han sido llamados incertidumbre inherente [18]. Esta incertidumbre se puede considerar como una limitante del modelo.

Los parámetros bajo los cuales se mide la exactitud de un modelo son los errores en las bases de datos y lo concerniente a la física y formulación del modelo.

Varios estudios realizados en otros países con el objetivo de medir la exactitud de los modelos han confirmado lo siguiente:

- Los modelos son más fiables para medir concentraciones promedio a largo plazo que para estimar concentraciones a corto plazo en un punto específico.
- Los modelos son bastante fiables estimando picos de concentraciones en un área determinada (los errores para este caso típicamente están entre $\pm 10\%$ a 40%).

Cuanto más se ajuste el modelo matemático a la física y química de la atmósfera, el modelo presentará mayor precisión. Lo mismo sucede con los datos de entrada: cuanto mayor sea la calidad de los datos, las concentraciones de salida serán mejores y más aproximadas a la realidad.

De acuerdo con las anteriores observaciones, el presente modelo debe ser leído en sus capacidades reales teniendo en cuenta su información de la siguiente forma:

- El modelo es fiable estimando los puntos de mayor concentración.
- Los resultados dan un orden de magnitud probable y solo en esas dimensiones puede ser interpretado.

Además de las limitaciones comunes a los modelos de dispersión atmosférica (error inherente) el presente modelo presenta las siguientes limitaciones que deben ser corregidas en estudios posteriores.

- La altura de mezcla se obtuvo de manera numérica a partir de datos de meteorología de superficie solamente. La altura de mezcla tiene generalmente un efecto notorio en las concentraciones máximas.
- Los datos de velocidad y dirección de viento usados tienen una resolución de 22,5 grados.
- Consideraciones de la idealización de las emisiones y las condiciones del escenario que influyen en la información empleada en la simulación. El tratarse de un evento puntual a modelizar, sin una caracterización clara, lleva a que se incremente la incertidumbre y el error en las tasas de emisión y resultados arrojados por el modelo. En este sentido debe indicarse que, de manera general, las decisiones tomadas en el proceso de definición del escenario y extrapolación de los datos de emisión se han tomado con un enfoque conservador para no infraestimar la exposición potencial ante un incendio en la instalación.

9 CONCLUSIONES

Modelo empleado

Con el fin de evaluar el impacto en la calidad del aire del entorno, de un escenario potencial de incendio en el sistema de almacenamiento con baterías (BESS) tipo stand alone, enmarcados dentro de la actuación 4256934 PA-BATERÍAS, asociado a un evento de thermal runaway, se procedió al desarrollo del presente estudio de modelización. Como modelo se optó por emplear AERMOD, modelo matemático de dispersión de plumas de estado estacionario, desarrollado y recomendado por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.) y utilizado globalmente. Evalúa la concentración y deposición de contaminantes atmosféricos primarios provenientes de fuentes industriales, urbanas y rurales y es un estándar empleado para evaluar impactos a corto plazo y distancias cortas (< 50 km).

A través de la aplicación de modelos de dispersión atmosférica de tipo gaussiano, específicamente mediante el uso de las herramientas AERMOD y AERMET, se busca estimar las concentraciones máximas de contaminantes en el aire en el entorno de las instalaciones objeto de estudio, bajo condiciones meteorológicas desfavorables tanto para la dispersión como para el transporte de contaminantes.

Meteorología

La modelización meteorológica del estudio se ha realizado con datos del modelo WRF correspondientes al dominio de simulación para el año 2025.

Las direcciones de vientos y velocidades que muestra la rosa de vientos obtenida con el programa procesador WRPLOT View para la zona, muestran los rumbos predominantes en la zona de estudio. Para la definición de los tres (3) escenarios concretos -día normal de dispersión, día favorable y día desfavorable- se realizó ajuste de las condiciones meteorológicas. El día de peor dispersión es una condición crítica, orientada a identificar el potencial máximo de impacto ante un posible evento accidental.

Establecimiento de tasas y modelización

Al tratarse de un evento de incendio se consideró como foco de emisión un área estacionaria, correspondiente al supuesto de que la emergencia afecta a todo un contenedor. A la hora de establecer las características de los focos de emisión, seleccionar los contaminantes, así como en el establecimiento de las tasas de emisión se ha acudido a la información técnica más ajustada al proyecto (implantación según proyecto, modelo y características de los sistemas BESS, así como datos de ensayos realizados por los fabricantes).

Tras el análisis de la información técnica se tomó como tiempo de duración del potencial escenario de incendio 4 horas (14.400 segundos) y un total de 3.328 celdas, considerando una emisión continua de todos los contaminantes. Para el establecimiento de las tasas de emisión, se adoptó una posición conservadora, suponiendo que cada una de las celdas del contenedor aportaría un volumen de gas equivalente al promedio tipo que se ha definido a partir de ejemplos de ensayos de fabricantes correspondientes a escenarios parciales.

Estas asunciones llevan a que las emisiones previstas, en lo que respecta a las tasas y al tiempo de duración del evento accidental planteado, se hayan establecido con un enfoque de prevención y protección del entorno en aras de ayudar en la toma de decisiones y definición de medidas de protección y activación de los planes de actuación en caso de emergencias.

El tiempo de respuesta ante un evento de estas características, así como las medidas de prevención y actuación serán factores condicionantes clave que harán que pueda variar la emisión estimada y la afección a los receptores del entorno.

Contaminantes modelizados y normativa en materia de calidad del aire

Entre los contaminantes estudiados, y que se identifican en la caracterización de los gases generados en función del tipo de celda que compone el contenedor de baterías, se encuentran el monóxido de carbono (CO), el hidrógeno (H₂), el material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}) y el fluoruro de hidrógeno (HF).

Para el contaminante CO, las concentraciones modeladas fueron comparadas con los valores límite establecidos por los AEGL (Acute Exposure Guideline Levels), considerando como criterio de evaluación el nivel de severidad AEGL-2 debido a que este contaminante no cuenta con valores de referencia establecidos para el nivel AEGL-1, el cual corresponde a efectos leves, transitorios o de incomodidad. Mientras que para el Hidrógeno (H_2), las concentraciones se compararán con su límite inferior de explosividad (LEL), debido a su elevada inflamabilidad en el aire ambiente. En el caso del material particulado, las concentraciones obtenidas fueron comparadas con los valores límite establecidos en el Real Decreto 102/2011. Para el fluoruro de hidrógeno, la evaluación se realizó frente a los valores de referencia definidos por los AEGL.

No debe olvidarse que se está estudiando un evento accidental de incendio de unas horas de duración, no una emisión o exposición sistemática por lo que en ningún caso se están representando las condiciones normales de operación de la instalación y deben interpretarse exclusivamente en el contexto del evento accidental modelado.

Resultados relativos a los escenarios considerados

Los resultados del modelo de dispersión de contaminantes permiten concluir que las concentraciones de los contaminantes evaluados están muy influenciadas por las condiciones meteorológicas, con diferencias significativas en concentraciones y receptores a los que llega la emisión derivada del escenario accidental en los tres (3) tipos de escenario de dispersión definidos. El escenario con peor día de dispersión presentó las mayores concentraciones, mientras que en el escenario de mejor y normal dispersión se muestra una disminución significativa en las concentraciones.

Para el monóxido de carbono (CO), los resultados del modelo muestran que los máximos horarios de monóxido de carbono en los tres escenarios modelados no se presentan receptores que superen los límites establecidos el nivel de severidad AEGL - 2.

En cuanto al hidrógeno (H_2), los resultados del modelo muestran que no hay superaciones en el Límite Inferior de Explosividad (LEL) en ninguno de los escenarios evaluados.

Los resultados obtenidos para material particulado muestran valores muy inferiores a los límites establecidos por el Real Decreto 102/2011, tanto para PM_{10} como para $PM_{2,5}$.

En el estudio se ha contemplado la posibilidad de que por el tipo de tecnología y proyecto se llegase a emitir fluoruro de hidrógeno (HF). Para este contaminante los resultados muestran que, bajo las hipótesis de emisión y condiciones meteorológicas consideradas, pueden alcanzarse concentraciones superiores al nivel de referencia AEGL-1 en determinadas zonas del entorno de la instalación. Esta situación se produce en el escenario correspondiente a las condiciones meteorológicas más desfavorables para la dispersión y afecta a un número limitado de receptores sensibles en la ubicación estudiada, solo un (1) receptor sensible.

El AEGL-1 corresponde con un nivel de exposición por encima del cual la población general, incluidos individuos susceptibles, podría experimentar molestias apreciables, irritación u otros efectos transitorios y reversibles, sin que se prevean efectos incapacitantes.

Por el contrario, la comparación de las concentraciones modelizadas con el nivel AEGL-2 no muestra superaciones en los receptores sensibles identificados en ninguno de los escenarios meteorológicos considerados. De acuerdo con la definición de los AEGL, el AEGL-2 constituye un nivel de referencia asociado a la posibilidad de aparición de efectos adversos graves, irreversibles o de larga duración, o a una alteración de la capacidad de escapar.

En consecuencia, bajo las hipótesis de emisión y dispersión adoptadas en el presente estudio, no se identifican superaciones del nivel de referencia AEGL-2 en los receptores sensibles considerados. El entorno en el que se alcanzarían valores por encima del nivel AEGL-2 sería de aproximadamente 50 metros desde el punto central en el que se ha modelizado el escenario accidental.

Debe destacarse, no obstante, que el escenario modelizado responde a un supuesto de afectación completa de un contenedor BESS, considerando la combustión de las 3.328 celdas contempladas en el

escenario y una emisión continua durante la totalidad del periodo de 4 horas. Estas hipótesis representan una condición de cálculo conservadora y no deben interpretarse como una descripción necesaria del desarrollo de un incendio real.

La configuración modular de las instalaciones, la compartimentación de los sistemas, las medidas de detección y protección contra incendios y la posibilidad de limitar la propagación del evento pueden modificar sustancialmente la evolución de un incendio real. Del mismo modo, el modelo no incorpora como hipótesis de reducción de emisiones la actuación de los sistemas de protección contra incendios, las medidas de mitigación, los protocolos de respuesta a emergencias ni las actuaciones de extinción. La activación y eficacia de estas medidas pueden reducir tanto la probabilidad de desarrollo completo del escenario como la magnitud y duración de las emisiones efectivamente producidas.

Por tanto, los resultados obtenidos deben entenderse como una caracterización de la potencial afección atmosférica asociada a un escenario accidental de referencia definido bajo hipótesis explícitas y conservadoras, y no como una predicción determinista del comportamiento de un eventual incendio en cualquier instalación BESS.

Síntesis y consideración territorial de los resultados

Como síntesis de los resultados obtenidos, el escenario accidental considerado muestra que la potencial afección atmosférica se encuentra fuertemente condicionada por las características de la emisión, las condiciones meteorológicas, la topografía del emplazamiento y la configuración concreta de la instalación.

De los contaminantes estudiados y con las tasas de emisión estimadas, el contaminante que muestra un mayor riesgo es el fluoruro de hidrógeno (HF). En su caso específico, y bajo las hipótesis de emisión, duración del evento y condiciones meteorológicas adoptadas en el presente ejercicio de modelización, el ámbito espacial asociado a concentraciones superiores al nivel de referencia AEGL-2 se sitúa en un entorno de aproximadamente 50 metros respecto del punto central utilizado para representar el foco accidental. Este resultado debe interpretarse exclusivamente como el resultado del escenario de cálculo analizado y no como una distancia de seguridad, distancia reglamentaria o distancia de afección generalizable a las instalaciones BESS.

En particular, la distancia de aproximadamente 50 metros no puede extrapolarse directamente a otras instalaciones, emplazamientos o configuraciones de almacenamiento, puesto que la extensión y geometría de la pluma de dispersión dependen de las características específicas del foco emisor, de la tecnología y química de las baterías, de la cantidad de material efectivamente afectado, de la duración y evolución del incendio, de las condiciones meteorológicas y de la topografía y orografía del emplazamiento.

Asimismo, las emisiones efectivamente producidas durante un incendio real estarán condicionadas por las medidas de prevención y protección incorporadas al diseño de la instalación, por los sistemas de detección, confinamiento, refrigeración y extinción, por la compartimentación y capacidad de limitar la propagación del evento y por el tiempo de respuesta y las medidas de actuación previstas en los correspondientes procedimientos de emergencia.

En consecuencia, el valor de aproximadamente 50 metros debe considerarse exclusivamente un resultado de referencia del escenario hipotético modelizado, útil para caracterizar el orden de magnitud de la posible afección atmosférica bajo las hipótesis adoptadas, pero no como un valor universal aplicable a cualquier instalación BESS ni como un criterio autónomo de aptitud o inadmisibilidad territorial.

La utilización de este resultado en el contexto de la planificación territorial debe realizarse, por tanto, conjuntamente con el resto de variables que condicionan la seguridad y la posible afección ambiental de estas instalaciones. Entre ellas adquieren especial relevancia la distancia y localización de los receptores sensibles, las características topográficas y meteorológicas del emplazamiento, la configuración y tecnología del sistema BESS, las medidas de prevención y protección contra incendios y las capacidades de respuesta y actuación ante una eventual emergencia.

De este modo, el estudio proporciona una base técnica para la consideración de la posible afección atmosférica de un escenario accidental dentro del proceso de ordenación territorial, sin que los resultados obtenidos deban interpretarse como una predicción determinista ni como la fijación, por sí mismos, de una distancia de separación aplicable con carácter general a las instalaciones de almacenamiento de energía mediante baterías.

10 EQUIPO REDACTOR

El presente estudio se ha realizado por el equipo redactor siguiente:

Giselle Vesga Consultora Graduada en Ingeniería Química	Marina García Consultora Graduada en Química
Alexander Berbeo Responsable de modelización Graduado en Ingeniería química Especialista en Evaluación Ambiental de proyectos	María Sánchez de Posada Jefa Departamento Medio y Consultoría (Delegación Asturias-Cantabria) Licenciatura Biología Ambiental Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental

11 ANEXOS

Anexo 1. Análisis de seguridad en los sistemas de almacenamiento basados en baterías de litio-ion

Anexo 2. Estimación de emisiones de contaminantes

Anexo 3. Validación de datos meteorológicos

Anexo 4. Archivos de modelación

Anexo 5. Carpeta SIG

Anexo 6. Resultados en receptores

12 LISTA DE ABREVIATURAS

Tabla 19. Lista de abreviaturas

Abreviatura o Símbolo	Descripción
"	Pulgada
°C	Grado centígrado
µg	Microgramo
µm	Micrómetro
a.m.	Horario terrestre trascurrido después de la medianoche hasta antes del mediodía
ad	Adimensional
AERMAP	Preprocesador de terreno
AERMET	Preprocesador de datos meteorológicos
AERMOD	Modelación de dispersión atmosférica
CA	Calidad del Aire
CO	Monóxido de Carbono
COT	Carbono Orgánico Total
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
Esc	02/12/2025
g	Gramo
H	Flujo de calor superficial
h	Hora
H ₂	Hidrógeno
H ₂ O	Agua
hc	Escala de altura del terreno para un receptor específico
HCl	Cloruro de Hidrógeno
HF	Fluoruro de Hidrógeno
ISO	Organización Internacional de Normalización
K	Grado Kelvin
kg	Kilogramo
km	Kilómetro
km ²	Kilómetro cuadrado
L	Longitud de Monin-Obukhov
m	Metro
m/s	metro por segundo
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
mb	Milibar
MD	Modelación
Mg	Megagramo
mg	Miligramo
mm	Milímetro
MM5	Modelo del clima
NCAR	<i>Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas</i>
ng	Nanogramo
Nm ³	Metro cúbico normal
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno
OMS	Organización Mundial de la Salud
p.m.	Horario terrestre transcurrido después del mediodía hasta antes de la medianoche
PBL	Capa límite planetaria

Abreviatura o Símbolo	Descripción
PCDD/F	Dioxinas y Furanos
pg	picogramo
PM	Material particulado
PM ₁₀	Partículas de diámetro aerodinámico inferior a 10 micras
PM _{2,5}	Partículas de diámetro aerodinámico inferior a 2,5 micras
R.D.	Real Decreto
RCCAVA	Red de Control de la Contaminación Atmosférica del Ayuntamiento de Valladolid
Ref.	Referencia
RP	Receptor poblacional
s	Segundo
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIG	Sistema de información geográfica
t	Tonelada
u*	Velocidad de fricción
VMT	Millas viajadas en vehículos
w*	Escala de velocidad convectiva
WRF	Weather Research and Forecasting
X	Coordenada Este
Y	Coordenada Norte
zic	Altura de la capa de mezcla convectiva
zim	Altura de la capa de mezcla mecánica
zo	Rugosidad superficial
zr	Nivel promedio del mar
θ*	Escala de temperatura

Fuente: Applus+ (estudio actual)

13 BIBLIOGRAFÍA

- Batiq Asesoría Tecnológica. (2026). *Análisis de seguridad en los sistemas de almacenamiento basados en baterías de litio-ion*. TRAGSATEC.
- C. Gaya, J. L.-C. (2025). *Environmental impact of lithium-ion BESS incidents compared to other types of fires*. National Fire Protection Association (NFPA) / Fire Protection Research Foundation, Tech. Rep.
- Cabrera, F; Universidad Nacional Autónoma de México. (2008). *Evaluación de un Modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos con la técnica espectroscópica DOAS Pasiva*.
- Environmental Protection Agency (US EPA). (2009). *Compilation Pollutant Emission Factors*. AP-42. Fifth Edition. Volume I: Stationary Point and Area Sources. United States of America.
- Farm, L. S. (Febrero de 2022). *BESS Plume Assessment*.
- Fuller, E. N., Schettler, P. D., & Giddings, J. C. (1966). New method for predicting gaseous diffusion coefficients. *Industrial & Engineering Chemistry*, págs. 18-27.
- JAXA/METI ALOS PALSAR. (s.f.). APA 27206 2015. Earthdata - NASA: ASF DAAC.
- Lakes Environmental. (2016). Software WRPLOT View V8.0.2. Waterloo, Ontario.
- Longfield Solar Energy Farm Ltd. (2022). *Longfield Solar Farm: Environmental Statement (PINS Ref. EN010118) BESS Plume Assessment*. Rep. EN010118/APP/6.2, Rev. 1.0.
- MeteoSIM. (2025). Meteorología WRF Proyecto Grenergy.
- Ministerio de la Presidencia. (2011). *Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire*.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (15 de Agosto de 2026). *Chemical Datasheet: Hydrogen*. Obtenido de CAMEO Chemicals: <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/8729>
- Red de control de la calidad del aire*. (s.f.). Recuperado el Julio de 2026, de <https://asturaire.asturias.es/>
- Rodriguez, D. (2015). Variación de la estabilidad y altura de la capa de mezcla en la ciudad de Pinar del Río: su relación con condiciones sinópticas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 1-15. doi:10.1590/0102-778620140014
- Sander, R. (2015). Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics*, págs. 4399-4498.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). (2024). *User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD)*. Research Triangle Park, NC: Office of Air Quality Planning and Standards.
- UL Solutions. (2025). *6MWh battery energy storage system Large Scale Fire Test*. Yichang.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (s.f.). *Monóxido de carbono - AEGL*. Obtenido de <https://www.epa.gov/aegl/carbon-monoxide-results-aegl-program>
- United States Environmental Protection Agency. (s.f.). *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals Volume 4*. Obtenido de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-11/documents/tsd53.pdf>
- Wesely, M. L. (1989). Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. *Atmospheric Environment*, págs. 1293-1304.
- Wilke, C. R., & Chang, P. (1955). Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions. *AIChE Journal*, págs. 264-270.