

Resumen Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Estudio cuantitativo de los intercambios de calor y humedad en superficies geográficas basado en datos meteorológicos

Autor: Álvaro Romero Calvo

Tutor: Alfonso Miguel Gañán Calvo

**Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016





Resumen Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

# **Estudio cuantitativo de los intercambios de calor y humedad en superficies geográficas basado en datos meteorológicos**

Autor:

Álvaro Romero Calvo

Tutor:

Alfonso Miguel Gañán Calvo

Catedrático de Universidad

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



# Agradecimientos

---

Este estudio no se hubiese podido realizar sin la colaboración directa e indirecta de muchas personas. Es probable que unas pocas palabras no puedan expresar el agradecimiento que siento por ellas, pero espero que, al menos, entiendan que son sinceras.

Mi primera entrada va para la persona que ha posibilitado que esté escribiendo estas líneas. Alfonso, gracias por confiar en mí desde el principio, por estar disponible y dispuesto ante la avalancha de correos, llamadas y visitas, por haberme transmitido cada día la perspectiva científica, técnica y humana que te caracteriza, por haber aportado luz en cada callejón sin salida, por dejar que me equivoque y, en definitiva, por haber sido un gran tutor y amigo a lo largo de estos meses.

Una especial mención va para aquellos que han aportado su granito de arena para llevar este estudio a buen puerto. Me refiero a Mitchell Rodríguez Toonen, que con sus siempre constructivas críticas ayudó a plantear una solución consistente, a Miguel Pérez-Saborid Sánchez-Pastor, cuyo vasto conocimiento bibliográfico fue de gran ayuda para resolver la estimación de las capas límites, a Manuel Silva Pérez e Isidoro Lillo Bravo, del Grupo de Investigación de Termodinámica y Energías Renovables de la ETSI, por su generosidad al proveer de los datos de radiación solar, a todo el personal de la AEMET que ha atendido mis numerosas peticiones y a Timothy Richard Oke, por cederme de forma desinteresada una copia de dos de sus más importantes publicaciones.

Hay otros que no han tenido que aguantar mis desvaríos sobre rugosidades superficiales, pero cuya simple presencia ha supuesto una inestimable fuente de inspiración. Isabel, es un orgullo tener una hermana que además de una gran científica sea una excepcional persona, en todos los ámbitos en los que alguien puede ser excepcional. Siempre serás mi primer ejemplo a seguir. Maricruz, has sido y serás siempre mi compañera, la persona que siempre está ahí y en la que más confío. Me has dado energía para luchar cada día, y la fuerza necesaria para sobreponerme a todos los obstáculos. Eres, simplemente, imprescindible. Carmen y Manolo, vuestro apoyo, confianza y cariño a lo largo de estos años os convierten en los mejores tíos que podría tener. Carmen y Antonio, si os considero como mis segundos padres es simplemente porque os lo habéis ganado a pulso. Gracias por haberme traído hasta aquí.

Dejo para el final a los verdaderos autores de este trabajo, mis padres. Con vuestro esfuerzo habéis posibilitado que haya llegado tan lejos, y con vuestro ejemplo que lo haya hecho de la mejor manera posible. Gracias por vuestra ilimitada generosidad y paciencia, y por haber conseguido que tenga la vida que quiero tener.

A todos vosotros, familiares, amigos y profesores, gracias.

*Álvaro Romero Calvo*

*Sevilla, 2016*



# Resumen

---

El propósito de este proyecto es el desarrollo y comprobación de un nuevo método para la medición de los intercambios de calor y humedad globales en superficies geográficas. Se realizará un análisis convectivo del flujo de aire sobre el terreno, combinando para ello las extensas bases de datos diezminutales de ciertas estaciones de la AEMET y diversas fuentes de radiación solar global.

Debido a su especial interés económico, urbanístico y sanitario, el proyecto se centrará en la evaluación del ampliamente conocido Efecto Isla de Calor. Las estaciones meteorológicas automáticas de Sevilla serán utilizadas para probar el modelo teórico y extraer valiosas conclusiones para futuros desarrollos.

Los datos meteorológicos empleados en este proyecto han sido cedidos por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y su coste asciende a 2340,42 €. Los datos de radiación solar global han sido proporcionados por el Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER) de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

Este documento resumen trata de imitar en lo posible la organización del TFG completo y se organiza como sigue:

El Capítulo 1 revisa brevemente el estado del arte de la Climatología Urbana, incluyendo definiciones elementales, la base termodinámica, el estudio del comportamiento de la Isla de Calor Urbana y sus efectos en la salud y la economía.

El Capítulo 2 explica y desarrolla un resumen del modelo teórico, discutiendo sus condiciones de aplicación y los riesgos asociados.

El Capítulo 3 realiza una explicación cualitativa de las herramientas desarrolladas para este proyecto, explicando los requisitos de diseño, sus limitaciones y resultados.

El Capítulo 4 muestra los resultados clave del proyecto para dos estaciones meteorológicas de Sevilla.

El Capítulo 5 extrae las conclusiones principales tras el análisis de resultados y propone futuras líneas de investigación.



<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>Índice</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Desarrollo Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. <i>Volumen de Control</i>	5
2.2. <i>Conservación de la masa:</i>	6
2.3. <i>Balance Energético</i>	6
2.4. <i>Evaluación de los flujos advectivos mediante integración de perfiles verticales</i>	7
2.4.1 <i>Modelo de Temperatura Superficial</i>	9
2.4.2 <i>Estimación de los parámetros de rugosidad:</i>	11
2.5. <i>Validación de las condiciones del modelo</i>	13
2.6. <i>Fuentes de datos:</i>	14
2.7. <i>Correcciones de datos:</i>	16
<b>3 Implementación</b>	<b>17</b>
<b>4 Resultados para Sevilla</b>	<b>11</b>
4.1. <i>Instrumentación:</i>	12
4.2 <i>Selección de filtros, parámetros de temperatura superficial y parámetros de rugosidad:</i>	13
4.3. <i>Resultados</i>	16
4.4 <i>Discusión de resultados</i>	29
<b>5 Conclusiones</b>	<b>31</b>
<b>Referencias</b>	<b>33</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: Variables aportadas en los ficheros de datos de la AEMET	15
Tabla 2: Relación de instrumentos de la estación de San Pablo (Sevilla). Datos cortesía de la AEMET	12
Tabla 3: Relación de instrumentos de la estación de Tablada (Sevilla). Datos cortesía de la AEMET	12
Tabla 4: Relación de filtros para el análisis de Sevilla	13
Tabla 5: Propiedades de los materiales para en análisis del mapa de Sevilla	14
Tabla 6: Resultados medios para el conjunto de estaciones de Sevilla	17



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1: Curva de temperatura anual para el centro de Londres (trazo continuo) y sus afueras (trazo punteado) desde 1797 hasta 1816. Dibujado por Gerald Mills [7] a partir de la Figura 3 en la segunda edición de “The Climate of London”	1
Figura 2: Representación conceptual de la estructura de la capa límite urbana.	2
Figura 3: Representación del volumen de control para la ciudad de Sevilla. Los puntos rojos	5
Figura 4: Representación básica de los flujos de calor	6
Figura 5: Evolución cualitativa de las capas límites viscosa y térmica sobre una placa plana	7
Figura 6: Rectificador de media onda. Por Krishnavedala (trabajo propio) [CC0], Wikimedia Commons	9
Figura 7: Señales de entrada y salida del rectificador. Por David Antonio Torres, Wikimedia Commons	9
Figura 8: Validación del Modelo de Temperatura Superficial con datos experimentales. a) CÉSPED: ( $\alpha = 0.25$ , $\varepsilon = 0.95$ , $K = 0.615$ , $v = 1.5\text{m/s}$ , $\text{HR} = 50\%$ ) b) ASFALTO: ( $\alpha = 0.95$ , $\varepsilon = 0.94$ , $K = 0.75$ , $v = 1.5\text{m/s}$ , $\text{HR} = 50\%$ )	10
Figura 9: Detección de asfalto en imagen en base al color en Sevilla. Imagen modificada de <i>Google Earth</i>	11
Figura 10: Regresión lineal de velocidades medidas para las estaciones de origen y destino en una de las direcciones ( $R^2=0.6741$ ). Datos de Sevilla cortesía de la AEMET	12
Figura 11: Modelo de estimación de rugosidades para datos de Sevilla	12
Figura 12: Representación de la configuración de llegada más restrictiva (máxima aproximación) para el set de estaciones de la ciudad de Sevilla	14
Figura 13: Vista de la interfaz principal de la herramienta de análisis desarrollada	17
Figura 14: Herramienta de análisis cruzado de variables	18
Figura 15: Población de Sevilla en el período bajo estudio. Extraído de [26]	11
Figura 16: Mapa de detección de materiales de Sevilla por color. Las zonas en blanco no están clasificadas	14
Figura 17: Representación en el espacio RGB de los colores de materiales y su tolerancia (esfera)	15
Figura 18: Gráfica de estimación de rugosidades para el set experimental de Sevilla	15
Figura 19: Mapa de correlación de Pearson para las variables de los eventos filtrados desde San Pablo hasta Tablada	16
Figura 20: Mapa de correlación de Pearson para las variables de los eventos filtrados desde Tablada hasta San Pablo	17
Figura 21: Representación direccional de velocidades en ambas estaciones para la muestra completa	18
Figura 22: Distribución estadística de la muestra completa de velocidades para ambas estaciones	18
Figura 23: Distribución estadística de la muestra completa de humedad relativa para ambas estaciones	19
Figura 24: Distribución estadística de la muestra completa de direcciones de viento. Nótese el efecto de las diferentes tolerancias en la discretización	19
Figura 25: Distribución horaria de eventos filtrados desde San Pablo hasta Tablada	20

Figura 26: Distribución mensual de eventos filtrados desde San Pablo hasta Tablada	20
Figura 27: Distribución horaria de eventos filtrados desde Tablada hasta San Pablo	21
Figura 28: Distribución mensual de eventos filtrados desde Tablada hasta San Pablo	21
Figura 29: Incremento de velocidad frente a velocidad en origen para el análisis San Pablo - Tablada. <b>R2</b> = 0.4425	22
Figura 30: Incremento de velocidad frente a velocidad en origen para el análisis Tablada - San Pablo. <b>R2</b> = 0.2414	22
Figura 31: Incrementos de temperatura y entalpía frente a radiación en origen para el análisis San Pablo – Tablada. <b>R2</b> ( $\Delta T$ ) = 0.4458, <b>R2</b> ( $\Delta h$ ) = 0.4789	23
Figura 32: Incrementos de temperatura y entalpía frente a radiación en origen para el análisis Tablada – San Pablo. <b>R2</b> ( $\Delta T$ ) = 0.0191, <b>R2</b> ( $\Delta h$ ) = 0.0261	23
Figura 33: Incrementos de temperatura y entalpía frente a la variación de irradiancia durante el tiempo de vuelo para el análisis San Pablo – Tablada. <b>R2</b> ( $\Delta T$ ) = 0.0946, <b>R2</b> ( $\Delta h$ ) = 0.0996	24
Figura 34: Incrementos de temperatura y entalpía frente a la variación de irradiancia durante el tiempo de vuelo para el análisis Tablada – San Pablo. <b>R2</b> ( $\Delta T$ ) = 0.0274, <b>R2</b> ( $\Delta h$ ) = 0.0662	24
Figura 35: Flujo advectivo de calor frente al incremento de entalpía medido para el análisis San Pablo - Tablada. <b>R2</b> = 0.1015	25
Figura 36: Flujo advectivo de calor frente al incremento de entalpía medido para el análisis Tablada- San Pablo. <b>R2</b> = 0.4247	25
Figura 37: Incrementos de temperatura, humedad y entalpía medidos como función de la hora de inicio del evento para el análisis San Pablo - Tablada. <b>R2</b> ( $\Delta T$ ) = 0.2620, <b>R2</b> ( $\Delta HR$ ) = 0.0215, <b>R2</b> ( $\Delta h$ ) = 0.2401	26
Figura 38: Incrementos de temperatura, humedad y entalpía medidos como función de la hora de inicio del evento para el análisis Tablada – San Pablo. <b>R2</b> ( $\Delta T$ ) = 0.1620, <b>R2</b> ( $\Delta HR$ ) = 0.0530, <b>R2</b> ( $\Delta h$ ) = 0.2407	26
Figura 39: Incrementos de temperatura, humedad y entalpía medidos como función del mes de inicio del evento para el análisis San Pablo - Tablada. <b>R2</b> ( $\Delta T$ ) = 0.1343, <b>R2</b> ( $\Delta HR$ ) = 0.0490, <b>R2</b> ( $\Delta h$ ) = 0.2933	27
Figura 40: Incrementos de temperatura, humedad y entalpía medidos como función del mes de inicio del evento para el análisis Tablada – San Pablo. <b>R2</b> ( $\Delta T$ ) = 0.1158, <b>R2</b> ( $\Delta HR$ ) = 0.1327, <b>R2</b> ( $\Delta h$ ) = 0.3699	27
Figura 41: Distribución estadística de la variación de humedad para ambos análisis	28
Figura 42: Distribución estadística de la desviación de la corriente para ambas estaciones	28
Figura 43: Estaciones meteorológicas automáticas de la AEMET en Madrid. Una cuarta estación se sitúa en las afueras	32
Figura 44: Torre meteorológica de la Universidad de Hamburgo	32





# 1 INTRODUCCIÓN

En el año 2015 el 53% de la población mundial vivía en áreas urbanas, un porcentaje que asciende hasta el 77% en los países más desarrollados [1]. Esto conlleva que más de 3.87 billones de personas viven en entornos poco naturales, lo que ha generado un interés creciente por sus importantes (y casi siempre negativas) implicaciones en la economía [2], la salud [3-5] y el medio ambiente [6]. Se hace por tanto necesario analizar adecuadamente este sistema, comprender su funcionamiento y plantear estrategias de mitigación y planificación urbanística.

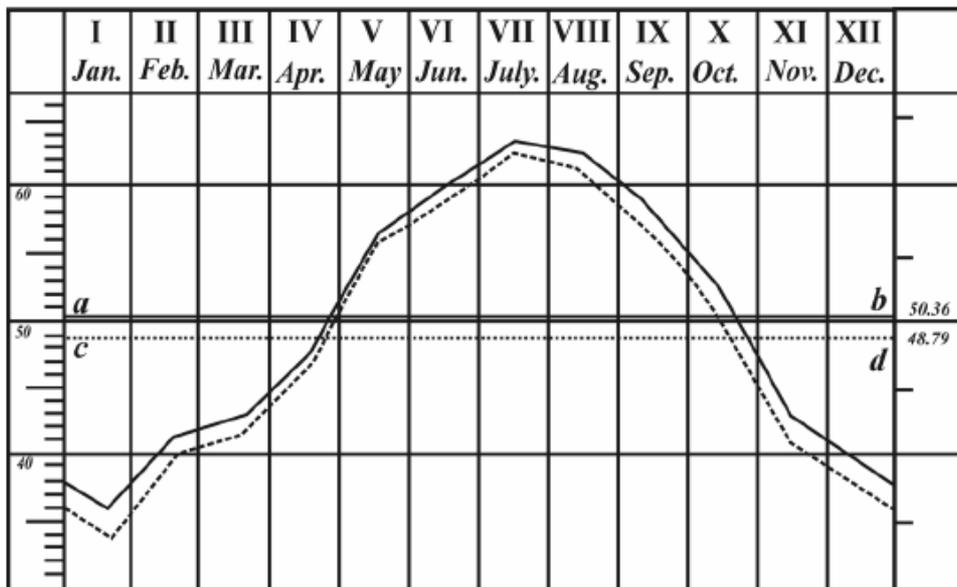


Figura 1: Curva de temperatura anual para el centro de Londres (trazo continuo) y sus afueras (trazo punteado) desde 1797 hasta 1816. Dibujado por Gerald Mills [7] a partir de la Figura 3 en la segunda edición de “The Climate of London”

El estudio de la climatología urbana nació en la primera década del siglo XIX de la mano de Luke Howard, quien descubrió un sistemático incremento de temperatura de aproximadamente 1°C del centro de Londres con respecto al terreno rural circundante [8]. Esta diferencia fue justificada por la presencia de fuentes de calor antropogénicas (respiración, fuegos, quema de combustibles...), una geometría urbana que impedía la expulsión de calor en forma de radiación, una mayor rugosidad que dificultaba el transporte convectivo y la falta de humedad [7]. Hoy día estas causas, con especial hincapié en las denominadas *geometrías de cañón*, la acumulación de materiales de alta absortividad en zonas urbanas y la ausencia de vegetación, siguen siendo consideradas como los principales culpables de lo que se ha venido a llamar el *Efecto Isla de Calor* [9].

El contraste entre datos de temperatura medidos a distintas alturas y su consistencia con modelos teóricos de transferencia de calor aparentemente contradictorios motivó que en 1976 T.R. Oke, uno de los padres indiscutibles de la climatología urbana moderna, propusiera [10,11] una clasificación de las distintas capas atmosféricas urbanas que sigue siendo aceptada hoy día. Sin entrar en detalles innecesarios, se diferencia entre

(traducción libre):

- *Capa Baja Urbana (UCL)*: Abarca desde el suelo hasta la altura de las edificaciones, y en ella se han realizado históricamente la mayoría de las mediciones [12]. Está caracterizada por una alta heterogeneidad espacial y temporal.
- *Capa Límite Urbana (UBL)*: Abarca desde el techo de las edificaciones hasta 1.5 Km aproximadamente [13]. Se subdivide a su vez en la *Subcapa Rugosa*, una zona de transición con una alta heterogeneidad vertical y horizontal, la *Subcapa Superficial*, donde los flujos verticales ya sí son horizontalmente homogéneos [12] y la *Subcapa Mixta*, donde los flujos verticales son horizontalmente homogéneos y verticalmente uniformes. Las fuerzas de Coriolis se vuelven importantes [14].

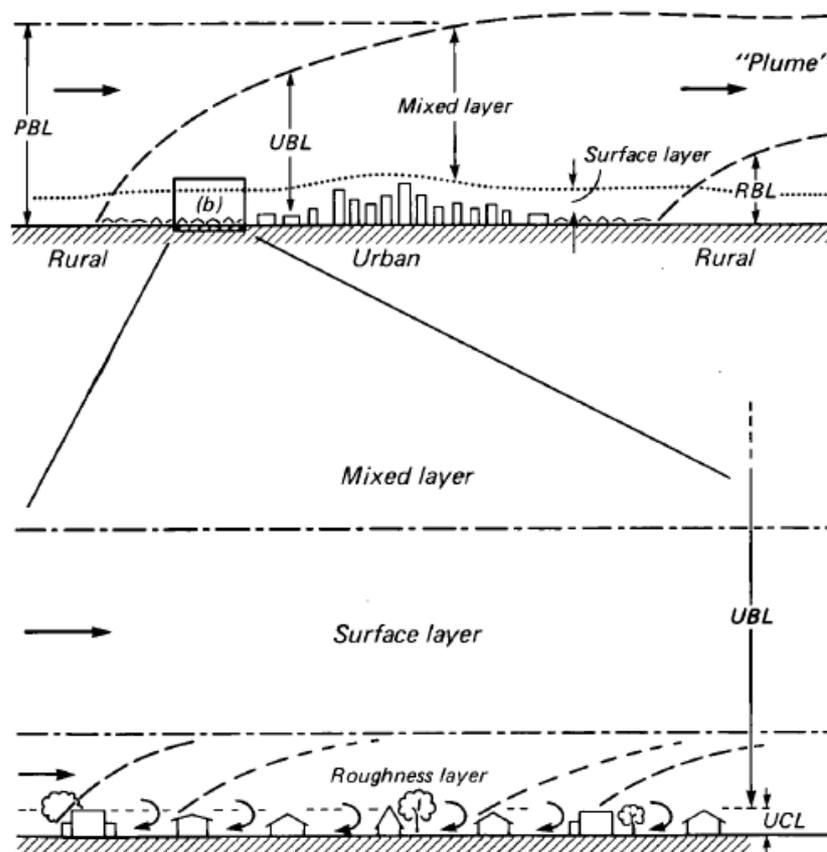


Figura 2: Representación conceptual de la estructura de la capa límite urbana.

Extraído de "The urban energy balance", T.R. Oke, Figura 2 [15]

La extensión vertical de cada capa ha sido estudiada por diferentes autores. Modelos en túnel de viento han mostrado una alta heterogeneidad (Subcapa Rugosa) por debajo de 1.8-5 alturas de edificación, dependiendo este valor de la separación y forma de los edificios [16-19]. La Subcapa Superficial es usualmente fina o inexistente si los efectos de heterogeneidad horizontal consiguen extenderse verticalmente [20].

Esta clasificación revela lo que se conoce como *problema de escala*, basado en el hecho de que cada una de las zonas anteriormente descritas tiene su balance energético característico, que incorpora interacciones entre sus unidades constituyentes y adyacentes [21]. Naturalmente, un aumento de la escala implica una pérdida de variabilidad espacial.

Desde los años 1970 la medición de la Isla de Calor Urbana se ha realizado fundamentalmente mediante tres procedimientos:

1. **Termómetros:** Se trata del método más antiguo, consistente en el empleo de termómetros fijos o móviles y en la realización de rutas en una ciudad y sus alrededores [10]. El objetivo suele ser medir y clasificar las diferencias de temperatura a nivel de suelo, sin entrar a estudiar los flujos de calor producidos.
2. **Balance de flujos:** Es una técnica más moderna que permite medir los flujos verticales de calor sensible y latente, así como el calor almacenado y el incremento de radiación sobre el terreno. Este tipo de experimentos se suelen realizar en espacios muy característicos como las ya mencionadas geometrías de cañón o los terrenos suburbanos [22], pretendiendo con ello elaborar un mapa de superficies que se comportan de forma análoga. Se trata, por tanto, de una metodología eminentemente local.
3. **Medición aérea mediante cámaras térmicas:** Se trata de una técnica que permite evaluar la temperatura superficial de un terreno mediante cámaras infrarrojas. Aunque proporciona imágenes claras de las diferencias entre distintos tipos de terreno, obvia por completo la contribución del agua y sus ciclos a los balances energéticos. [23]

Este proyecto de investigación se centra en el diseño y comprobación de un modelo teórico que permita medir los flujos de calor y humedad totales que se generan en una ciudad. Se intenta con ello proporcionar una herramienta de alcance global y seguimiento continuo, características ambas ausentes en los anteriores métodos. Una serie de estaciones meteorológicas, ubicadas reticularmente alrededor la zona bajo estudio, tendrían la función de medir los incrementos de temperatura y humedad que sufre el aire al atravesar el terreno, consiguiendo finalmente calcular su ganancia de energía y, con ella, el calor total cedido.

Este camino, que hasta donde alcanza nuestro conocimiento nunca ha sido explorado, permitiría dotar a futuros investigadores de una potente herramienta de análisis que podría ser aplicada no solo al estudio de la climatología urbana, sino también a la evaluación energética de cualquier tipo de terreno. Las potenciales aplicaciones prácticas de los resultados de este trabajo abarcan desde la planificación urbanística hasta la monitorización continua de cultivos o superficies forestales.



## 2 DESARROLLO TEÓRICO

El planteamiento del problema consiste en la definición de un modelo teórico sencillo y en el posterior filtrado de una extensa base de datos para su adecuación a las condiciones del primero.

### 2.1. Volumen de Control

El volumen de control empleado queda definido en la Figura 3 como el corredor de una masa de aire que se mueve desde el punto 1 al 2, donde las paredes 1 y 2 son fijadas por la posición de las estaciones, las laterales por dos teóricas líneas de corrientes paralelas a la principal, la superior por el espesor de la capa límite y la inferior por el terreno.

La definición de los espesores en origen y destino queda condicionada a la estimación del perfil vertical de velocidades y a la aplicación de la correspondiente ecuación de conservación de la masa. Se hace la hipótesis de que la evolución del fluido a lo largo de la línea de corriente es representativa de toda la ciudad, por lo que a efectos de cálculo del calor cedido el ancho del volumen de control es igual a un ancho característico, la raíz cuadrada de la superficie urbana.

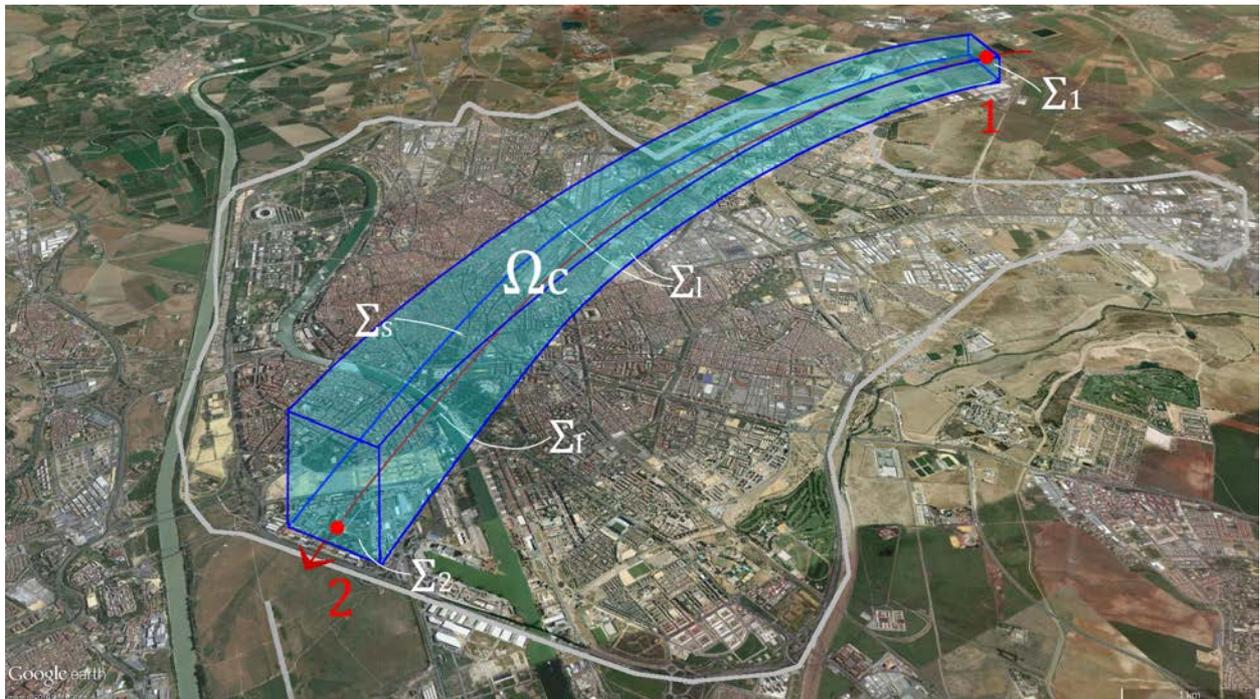


Figura 3: Representación del volumen de control para la ciudad de Sevilla. Los puntos rojos 1 y 2 representan las estaciones meteorológicas empleadas.



Bajo estas condiciones, y conociendo los perfiles de velocidad, temperatura y humedad en las paredes 1 y 2, es posible calcular los calores advectivos ( $Q_A$ ), quedando como resultado la ecuación mostrada a continuación:

$$\int_0^{\delta_{v2}} b\rho_2(z)v_2(z) \left( h(z) + \frac{1}{2}v(z)^2 + gz \right) dz - \int_0^{\delta_{v1}} b\rho_1(z)v_1(z) \left( h(z) + \frac{1}{2}v(z)^2 + gz \right) dz = \int_{S_f} (\vec{n} \cdot \vec{\tau}) \cdot \vec{v} dS + Q_F + \Delta Q_S + Q_H + Q_E + Q_{air}^*$$

Así, los flujos de calor antropogénico ( $Q_F$ ), sensible ( $Q_E$ ), latente ( $Q_H$ ), de radiación directa al aire ( $Q_{air}^*$ ), y almacenado ( $\Delta Q_S$ ) son iguales en conjunto a la diferencia de calores advectivos:

$$Q_{A2} - Q_{A1} = W + \bar{Q}$$

## 2.4. Evaluación de los flujos advectivos mediante integración de perfiles verticales

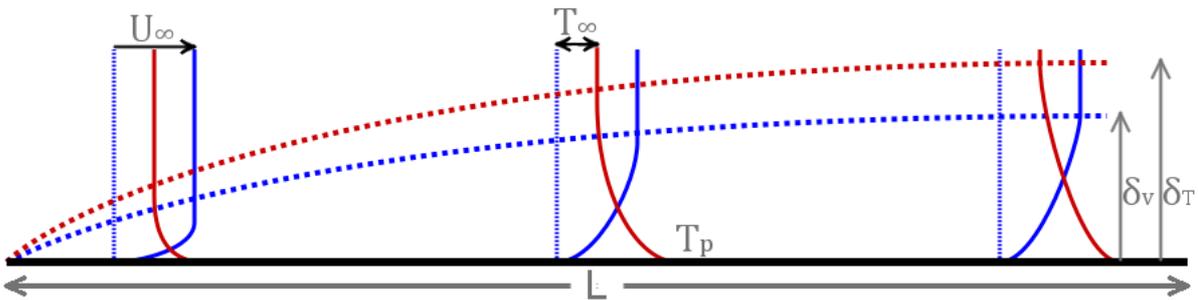


Figura 5: Evolución cualitativa de las capas límites viscosa y térmica sobre una placa plana

Como se ha indicado, los flujos advectivos deben ser evaluados en base a la integración con la altura de los perfiles verticales de velocidad, temperatura y humedad. Un problema capital surge en este proceso, pues un único punto de medición a una altura de 10 metros está disponible.

Los perfiles atmosféricos suelen calcularse mediante leyes logarítmicas en las que un parámetro de rugosidad y una velocidad basada en el esfuerzo en la pared determinan la forma del perfil. La carencia común de estas teorías es que solo son válidas para condiciones de estabilidad neutra (esto es, sin considerar flotabilidad). Para el caso inestable, se suele emplear la Teoría de Similitud de Monin-Obukhov, que contabiliza el efecto de la flotabilidad basándose en una serie de parámetros obtenidos experimentalmente en diversos ensayos históricos (Experimento de Kansas). La explicación de la teoría queda fuera del alcance de este resumen, pero puede consultarse en la bibliografía [24]. Los perfiles requeridos adoptarían la siguiente formulación:

$$\begin{aligned}\bar{u}(z) &= \frac{u_*}{k} \left[ \log \left( \frac{z-d}{z_0} \right) - \Psi_M(\zeta) \right] \\ \bar{\theta}(z) &= \theta_0 - \frac{\theta_*}{k} \left[ \log \left( \frac{z-d}{z_0} \right) - \Psi_H(\zeta) \right] \\ \bar{x}(z) &= x_0 - \frac{x_*}{k} \left[ \log \left( \frac{z-d}{z_0} \right) - \Psi_V(\zeta) \right]\end{aligned}$$

Donde velocidad ( $u$ ), temperatura potencial ( $\Theta$ ) y humedad ( $x$ ) quedan dependientes de los valores en la pared ( $\square_0$ ), los parámetros basados en el gradiente en la pared ( $\square^*$ ), las rugosidades del terreno ( $z_0$ ), las alturas a las que las variables se anulan ( $d$ ) y los parámetros de estabilidad integrados de Monin-Obukhov ( $\Psi$ ), que a su vez dependen del parámetro de estabilidad  $\zeta$ . Este parámetro es calculado como la altura entre la Longitud de Monin-Obukhov ( $L$ ), definida como aquella en la que la turbulencia generada por la rugosidad del terreno es igual a la generada por la flotabilidad y calculada imponiendo un Número de Richardson ( $Ri$ ) unidad.

Suponiendo conocido  $Ri$ , es posible determinar los parámetros del perfil. Para ello solo hay que tener en cuenta que los datos de velocidad, temperatura y humedad están disponibles a una altura de 10 metros. El algoritmo sería:

1. Estimación de los parámetros de rugosidad  $z_0$
2. Cálculo del parámetro de estabilidad ( $\zeta$ ) y de la Longitud de Monin-Obukhov ( $L$ ).
3. Cálculo de los parámetros de estabilidad integrados.
4. Cálculo de los parámetros basados en el gradiente en la pared como resultado de despejarlos de las ecuaciones de los perfiles logarítmicos para la altura de medición.

Finalmente, el calor advectivo vendrá dado por la siguiente expresión:

$$Q_A = L_c \int_0^{\delta_v} \rho(z)v(z) \left[ h(z) + \frac{1}{2}v(z)^2 + gz \right] dz = L_c \int_0^{\delta_v} \rho(z)v(z) \left[ C_p(z)T(z) + L_v(z)x(z) + \frac{1}{2}v(z)^2 + gz \right] dz$$

Donde  $L_c$  es el ancho característico del volumen de control,  $C_p$  es el calor específico del aire húmedo,  $L_v$  es el calor latente de vaporización del agua y  $h$  es la entalpía del aire húmedo.

Queda en este punto patente la necesidad de conocer dos variables más. Por un lado, la humedad del suelo es necesaria para calcular el perfil de humedad. Por el otro, la temperatura del suelo se emplea en el perfil y también en el cálculo de  $Ri$ , cuya estimación basada en cocientes incrementales puede escribirse como:

$$Ri_B = \frac{g}{T} \frac{\Delta\theta \Delta z}{u(z)^2}$$

La humedad en el suelo es desconocida y difícilmente se puede calcular un valor medio para un terreno determinado. Por este motivo, se supondrá igual a la medida a 10 metros, habida cuenta de que al calcular la diferencia de los perfiles de entrada y salida el error asociado se anulará en su mayor parte.

Respecto a la temperatura de suelo, se realiza una abstracción física y se considera una placa plana cuya temperatura es igual a la media de temperaturas de las superficies del terreno. Para ello, es necesario desarrollar un Modelo de Temperatura Superficial.

### 2.4.1 Modelo de Temperatura Superficial

Es una pieza clave de este proyecto, al proveer un dato imprescindible para la evaluación de los perfiles. La principal hipótesis de este modelo es la consideración del terreno como un sistema capacitivo. Considerando un terreno equivalente cuyas propiedades son las medias del real y estableciendo una analogía eléctrica con el rectificador de media onda, es posible determinar una estimación de la curva horaria de temperaturas superficiales medias.

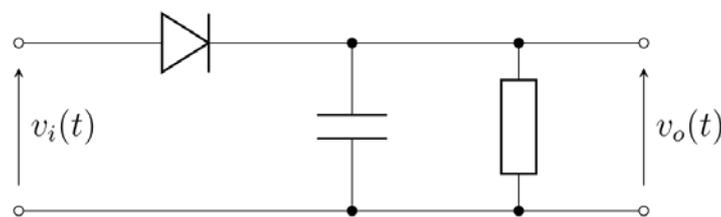


Figura 6: Rectificador de media onda. Por Krishnavedala (trabajo propio) [CC0], Wikimedia Commons

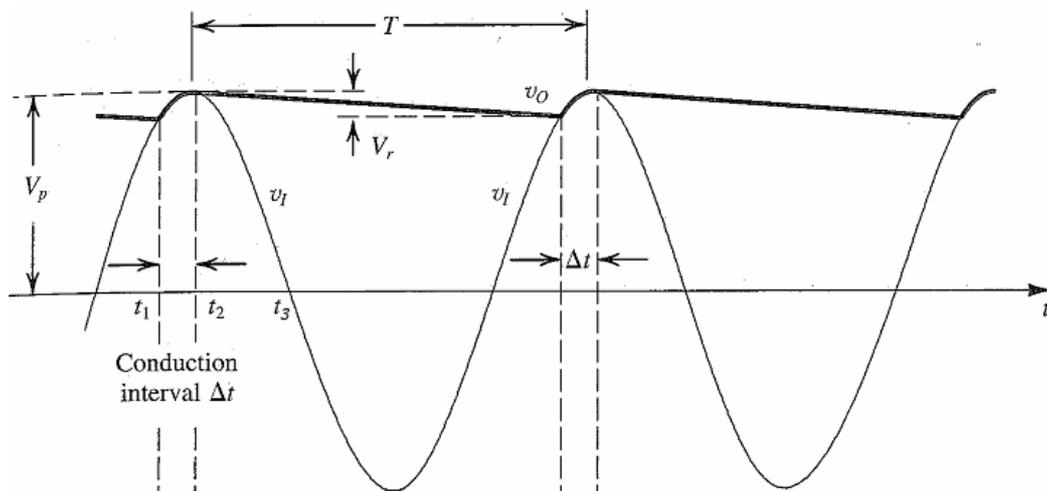


Figura 7: Señales de entrada y salida del rectificador. Por David Antonio Torres, Wikimedia Commons

Conociendo la temperatura máxima del suelo en el pico de radiación solar y justo antes del amanecer, se puede reproducir esta curva adaptando las ecuaciones del rectificador. Así, el voltaje de entrada del sistema (onda sinusoidal positiva) será ahora la radiación solar multiplicada por un factor de escala  $K$ , y el voltaje de salida será la diferencia entre la temperatura de pared y la temperatura de pared mínima. El resultado es:

$$T_p(t) = \begin{cases} T_{pmin} + KQ^*(t) & t \leq t_2 \\ \frac{t_3-t}{t_3-t_2}(KQ^*(t) + T_{pmin}) + \frac{t-t_2}{t_3-t_2}((KQ_{max}^* + T_{pmin} - T_{fmin})e^{-\frac{-(t-t_2)}{RC_{cap}}} + T_{fmin}) & t_2 < t < t_3 \\ T_{fmin} + (KQ_{max}^* + T_{pmin} - T_{fmin})e^{-\frac{-(t-t_2)}{RC_{cap}}} & t \geq t_3 \end{cases}$$

Donde  $T_{pmin}$ ,  $T_{fmin}$  y  $Q^{*max}$  son la temperatura mínima de pared, mínima del aire y la radiación máxima respectivamente. Los parámetros  $K$  y  $RC_{cap}$  son ajustados mediante un modelo de transmisión de calor, que incluye el balance radiante, la pérdida convectiva de calor, las fuentes antropogénicas y el calor almacenado. El calor antropogénico ha sido estimado en  $30W/m^2$  y la acumulación del terreno en un 35% de la energía radiante incidente, todo ello atendiendo a fuentes bibliográficas [21,22]. El coeficiente de película ( $h$ ) ha sido calculado mediante la Correlación de Chilton-Colburn y es válido para  $5 \cdot 10^5 < Re < 10^8$ :

$$h(T_p - T_f) + \sigma(\epsilon T_p^4 - \alpha T_f^4) + \alpha E + Q_A + \Delta Q_S = 0 \rightarrow (T_p - T_f)_{max}$$

Así,  $K=(T_p-T_{pmin})/Q^{*max}$  y  $RC_{cap}$  se ajusta para cumplir la condición de que la temperatura de pared sea  $1^\circ C$  superior a la del aire justo antes del amanecer, hipótesis aparentemente adecuada para terrenos urbanos.

Con el objetivo de validar este modelo, muy dependiente de ciertas suposiciones basadas en la bibliografía, se implementa para compararlo con un ensayo experimental en la ciudad de Phoenix ( $\phi=33^\circ 31' 42'' N$ ), Arizona, desde el 4 de Julio de 1989 hasta el 14 de Septiembre de 1989. Considerando un pico de radiación de  $1100 W/m^2$  (obtenido del histórico de Sevilla, cuya latitud es cuatro grados superior) y valores típicos de las propiedades de los materiales, llegamos al resultado mostrado en la Figura 8, que valida con creces las suposiciones realizadas.

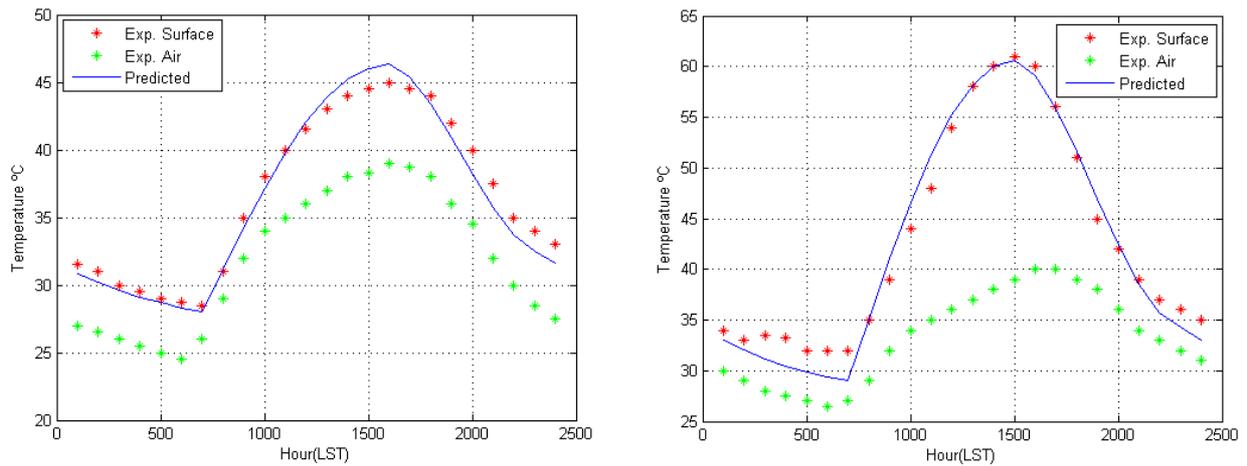


Figura 8: Validación del Modelo de Temperatura Superficial con datos experimentales. a) CÉSPED: ( $\alpha = 0.25$ ,  $\epsilon = 0.95$ ,  $K = 0.615$ ,  $v = 1.5m/s$ ,  $HR = 50\%$ ) b) ASFALTO: ( $\alpha = 0.95$ ,  $\epsilon = 0.94$ ,  $K = 0.75$ ,  $v = 1.5m/s$ ,  $HR = 50\%$ )

Datos experimentales adaptados de [25]

La estimación de la absorptividad ( $\alpha$ ) y emisividad ( $\epsilon$ ) del terreno equivalente se realiza mediante una media ponderada de las propiedades del área bajo estudio. Esta media es efectuada mediante un análisis de imagen similar a la mostrada en la Figura 9, en la que un material cuyas propiedades son conocidas es seleccionado en el mapa en base a su color y una tolerancia en el espacio RGB. Con un conjunto suficientemente grande de materiales, es posible realizar una media aproximada de los parámetros del terreno equivalente, consiguiendo con ello cerrar el cálculo de la temperatura superficial.

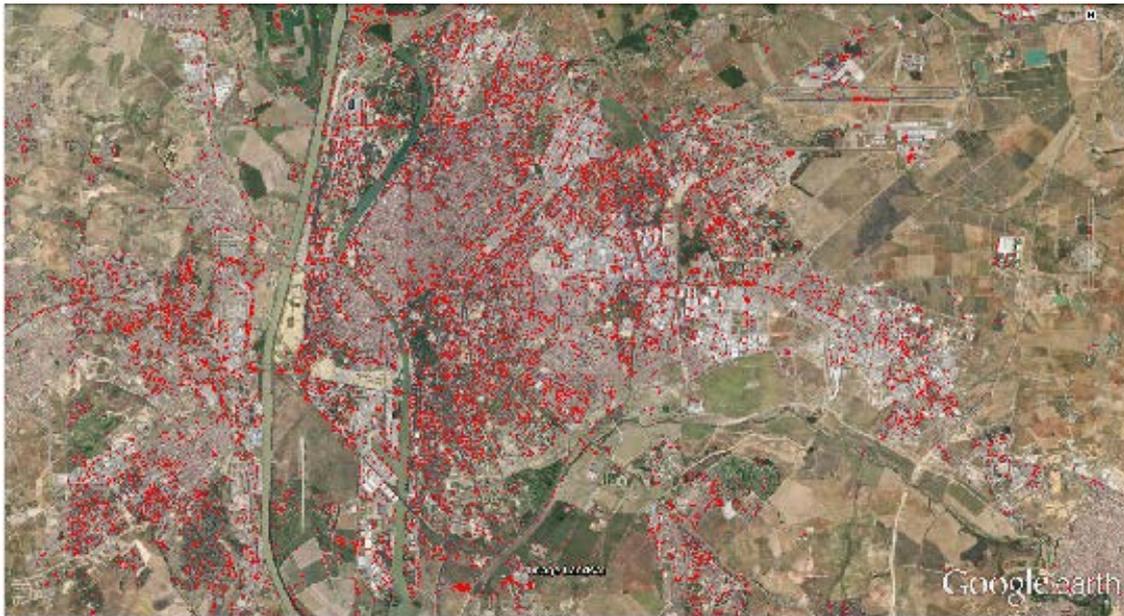


Figura 9: Detección de asfalto en imagen en base al color en Sevilla. Imagen modificada de *Google Earth*

#### 2.4.2 Estimación de los parámetros de rugosidad:

Si varias alturas de medición estuviesen disponibles, la determinación de la rugosidad media del terreno aguas arriba sería trivial, pues consistiría únicamente en el ajuste de la curva. Sin embargo, solo se dispone de un punto a 10 metros de altura, por lo que hay que buscar otra metodología.

Se suele estimar el parámetro de rugosidad de un terreno en base a tablas experimentales o correlaciones aplicadas a una zona edificada. Sin embargo, este procedimiento ha sido considerado muy impreciso para este estudio por el gran efecto de las rugosidades en el perfil. Por ello, se ha desarrollado un método para estimar las relaciones entre las tres rugosidades involucradas: la del terreno aguas arriba de la primera estación ( $z_1$ ), la del intermedio ( $z_2$ ) y la del que está aguas abajo de la segunda estación ( $z_3$ ).

Restringiendo el estudio a aquellas situaciones en las que la flotabilidad es despreciable y su influencia en las mediciones inexistente (horas nocturnas), y combinando adecuadamente las ecuaciones de los perfiles, se llega a los siguientes cocientes de velocidades medidas (donde el parámetro  $d$  ha sido eliminado para simplificar la notación):

$$\frac{u_{m2}^{S1 \rightarrow S2}}{u_{m1}^{S1 \rightarrow S2}} = \frac{u_{\infty 2}^{S1 \rightarrow S2} \log(z_m/z_2)/\log(z_{\infty}/z_2)}{u_{\infty 1}^{S1 \rightarrow S2} \log(z_m/z_1)/\log(z_{\infty}/z_1)} \quad \frac{u_{m1}^{S2 \rightarrow S1}}{u_{m2}^{S2 \rightarrow S1}} = \frac{u_{\infty 1}^{S2 \rightarrow S1} \log(z_m/z_2)/\log(z_{\infty}/z_2)}{u_{\infty 2}^{S2 \rightarrow S1} \log(z_m/z_3)/\log(z_{\infty}/z_3)}$$

Se trata de dos ecuaciones con seis incógnitas, de las cuales tres pueden aproximarse:

- $z_{\infty}$ : Se supone igual a 1000 m, un valor medio del techo de la UBL. Como consecuencia de la carga física de la siguiente estimación, este parámetro tiene una influencia muy limitada en el resultado final.
- Los dos cocientes de velocidades en el infinito se consideran unidad. Esto es incorrecto desde un punto de vista estricto, porque la velocidad en el infinito cuando el aire se mueve de una estación a otra (bajo

hipótesis de movimiento estacionario) está sujeta a variaciones asociadas a la rugosidad del terreno y a su geometría macroscópica, pero se asume la hipótesis de que estas variaciones no son lo suficientemente importantes para afectar significativamente a las mediciones. En otras palabras, se considera que las diferencias entre estaciones de la velocidad medida a baja altura están asociadas principalmente a la rugosidad del terreno circundante y no tanto a las variaciones en el infinito.

Así, calculando los cocientes de velocidades medidas y obteniendo su valor medio para la base de datos filtrada (una regresión lineal como la mostrada en la Figura 10), se obtiene una gráfica similar a la de la Figura 11. Ésta proporciona una aproximación de las relaciones entre las rugosidades, con lo que la estimación de una de ellas sigue siendo necesaria. Los criterios de filtrado serán explicados más adelante.

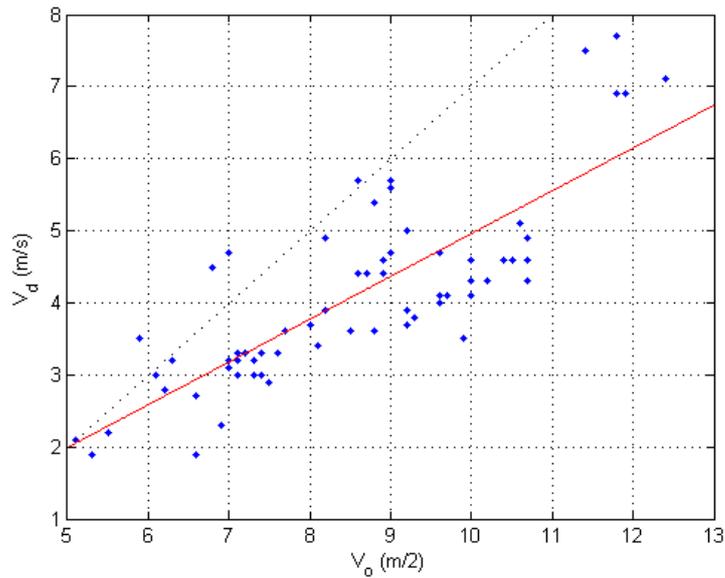


Figura 10: Regresión lineal de velocidades medidas para las estaciones de origen y destino en una de las direcciones ( $R^2=0.6741$ ). Datos de Sevilla cortesía de la AEMET

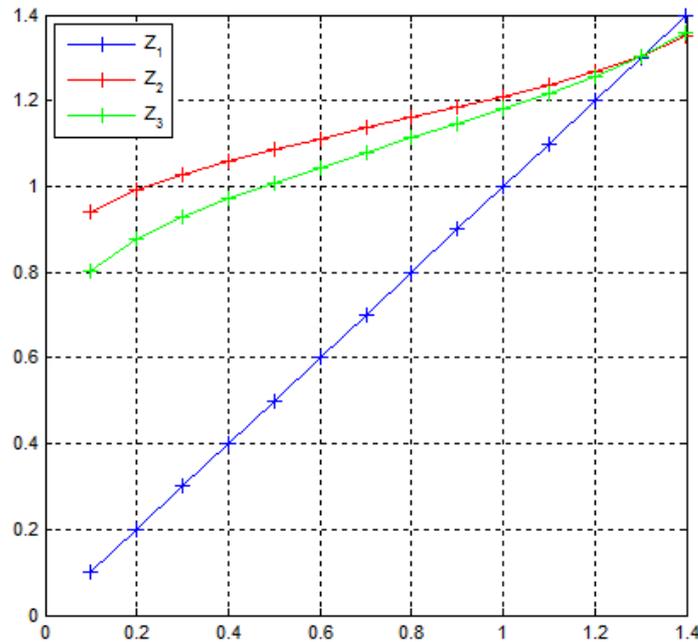


Figura 11: Modelo de estimación de rugosidades para datos de Sevilla

## 2.5. Validación de las condiciones del modelo

Como se ha comentado anteriormente, para ajustar la enorme base de datos disponible a las condiciones de aplicación del modelo es necesario filtrarla. No se tiene que perder de vista que, con la instrumentación disponible (que será descrita más adelante), las medidas se realizan en la Capa Rugosa, lo que lleva asociado una alta heterogeneidad espacial y temporal. Por ello, considerando la Descomposición de Reynolds, se debe seleccionar un tiempo característico de unos pocos minutos para obtener la parte constante y minimizar la variable  $\sigma$ , lo que es lo mismo, la heterogeneidad.

Para ello, se definen estos parámetros de filtrado:

1.  **$\delta T$** : Para lograr las condiciones de problema estacionario es necesario que los flujos de calor sean aproximadamente constantes mientras dura la medición. Para ello se define este parámetro, que restringe la variación porcentual máxima de la temperatura superficial desde el instante de medición en la primera estación hasta el instante de medición en la segunda.
2.  **$\delta V$** : Define la variación porcentual máxima admitida de velocidad para los registros de ambas estaciones. Persigue la condición de movimiento estacionario.
3.  **$\delta VV$** : Con el mismo objetivo que el anterior, este parámetro de control de turbulencia en velocidad define la máxima diferencia admisible entre la máxima velocidad medida en el tiempo característico y la media.
4.  **$\delta C$** : Este parámetro delimita los grados que puede desviarse la corriente respecto a la línea de unión de dos estaciones. Con ello se consigue obtener solo aquellos registros que van en la dirección deseada. En este punto es importante decir que el rumbo de una partícula que va de una estación a otra se calcula como la media ponderada de las velocidades y direcciones en las estaciones de origen y destino según la posición relativa de la partícula respecto a ellas.
5.  **$\delta \xi$** : Al igual que con la velocidad, se define un parámetro de máxima turbulencia admisible en dirección, que persigue cumplir las condiciones de movimiento estacionario.
6.  **$P_{mín}-P_{máx}$** : Define el rango de precipitaciones admisible durante la medición.
7.  **$N_{mín}-N_{máx}$** : Define el rango de nubosidad admisible durante la medición. La nubosidad es un parámetro que se calcula en base a los datos de irradiancia, restando a la predicción de la curva de radiación (sinusoidal perfecta) la medida real y dividiendo entre la primera para cada día.
8. **Criterios de llegada**: Se definen tres posibles criterios de llegada:
  - a. **Hipótesis balística**: El método más sencillo, basado en el cálculo del tiempo de vuelo como función de la distancia entre estaciones y la velocidad media.
  - b. **Máximo acercamiento**: La trayectoria para los eventos validados es calculada y el punto más cercano se considera el final.
  - c. **Acercamiento dentro de tolerancia**: La opción más restrictiva, que suma al anterior planteamiento la condición de que el punto final quede dentro de una circunferencia de radio  $L \cdot \delta L$ , donde  $\delta L$  es el parámetro de aproximación.

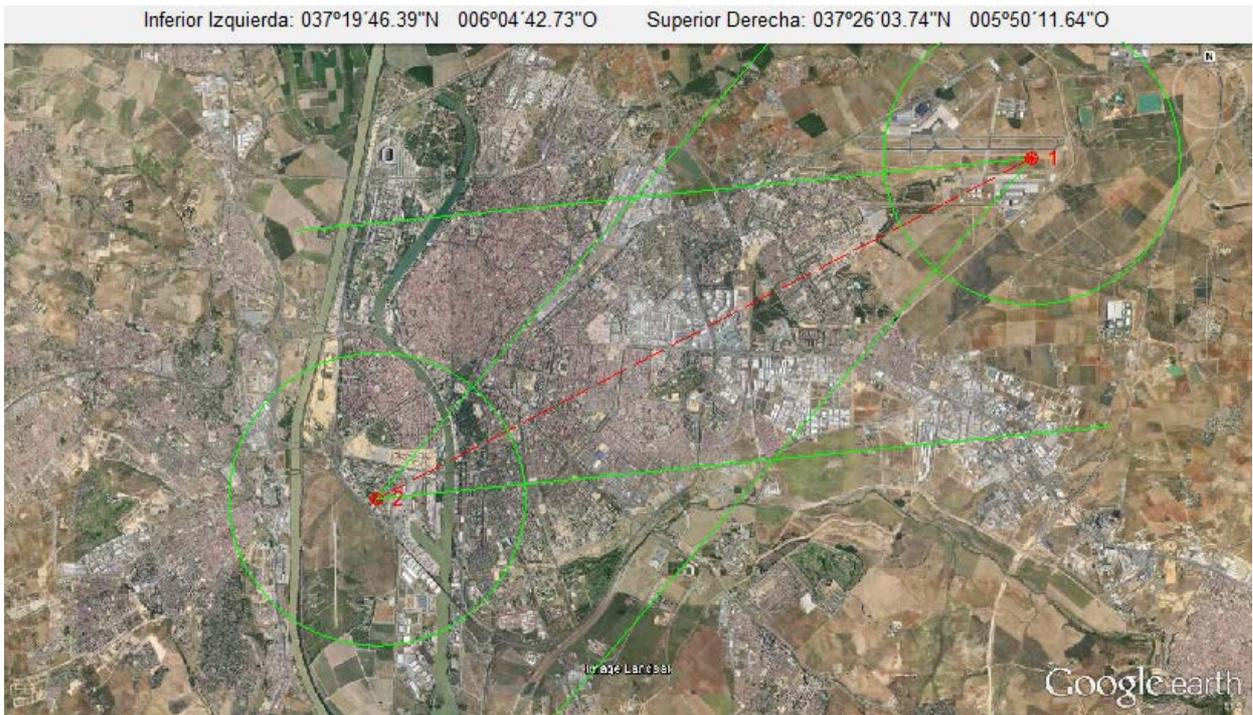


Figura 12: Representación de la configuración de llegada más restrictiva (máxima aproximación) para el set de estaciones de la ciudad de Sevilla

## 2.6. Fuentes de datos:

La mayoría de los registros meteorológicos se realizan dentro de la UCL, lo que automáticamente los descarta para este proyecto. Adicionalmente, las mediciones deben tomarse cada pocos minutos de forma automática, lo que resulta caro y poco común. Afortunadamente, en España la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) ha implantado desde el año 2009 varias estaciones automáticas en diversas ciudades del país, capaces de realizar mediciones medias de alta precisión con un tiempo característico de 10 minutos, aceptable para los requisitos de esta investigación.

El listado de variables incluidas en los archivos proporcionados por la AEMET son mostrados en la Tabla 1.

Los datos de radiación solar global para la ciudad de Sevilla han sido obtenidos a través del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables de la ETSI de Sevilla.

El coste de los datos cedidos por la AEMET asciende a 2340,42 € e incluye los registros diezminutales de Sevilla y Madrid durante el período 2009-2015.

**Tabla 1: Variables aportadas en los ficheros de datos de la AEMET**

<b>VARIABLE</b>	<b>IMPORTANCIA</b>	<b>UNIDADES</b>
<b>Número ID</b>	Menor	N/A
<b>Fecha</b>	Crítica	N/A
<b>Estación</b>	Menor	N/A
<b>Altitud</b>	Crítica	m
<b>Provincia</b>	Menor	N/A
<b>Longitud</b>	Crítica	°
<b>Latitud</b>	Crítica	°
<b>Precipitaciones</b>	Sustituible	mm
<b>Temperatura</b>	Crítica	°C
<b>Velocidad</b>	Crítica	m/s
<b>Dirección</b>	Crítica	°
<b>Máx. Velocidad</b>	Menor	m/s
<b>Máx. Dirección</b>	Menor	°
<b>Humedad Rel.</b>	Crítica	%
<b>Presión</b>	Sustituible	hPa

## 2.7. Correcciones de datos:

Se aplica una corrección de altitud para equiparar los datos de todas las estaciones. Así, cuando las bases de datos de la AEMET son preprocesadas para una determinada ciudad, se escoge una altitud de referencia igual a la de la estación menos elevada ( $h_{ref}$ ) y temperatura y presión son ajustadas a la misma siguiendo el modelo ISA. Las ecuaciones resultantes son:

$$T_{ref} = T(h) - \gamma_T (h - h_{ref})$$

$$p_{ref} = p(h) \left( \frac{T(h)}{T(h) - \gamma_T (h - h_{ref})} \right)^{\frac{g}{\gamma_T R}}$$

Donde  $\gamma_T = -6.5 \cdot 10^{-3}$  es el gradiente térmico,  $R = 287.05 \text{ J/KgK}$  es la constante específica del aire seco y  $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$  es la aceleración de la gravedad.

Los perfiles verticales de temperatura también son ajustados según la *temperatura potencial*, definida como la temperatura que un volumen de aire tendría a una presión arbitraria de 100 KPa. Se suele calcular de forma sencilla como  $\theta = T + \Gamma z$ , donde  $\Gamma$  es el gradiente adiabático.

Aquellos registros que carecen de uno o más datos críticos son eliminados para evitar fallos en el procesado. Si una de las variables marcada como *Sustituible* falta temporalmente o no es registrada, entonces se intenta su adaptación desde otras estaciones de la zona. Es el caso de los registros de presión (con corrección de altura) y precipitaciones.

# 3 IMPLEMENTACIÓN

Aunque el objetivo de este resumen no es describir de forma exhaustiva las herramientas empleadas en el análisis de los datos, sí es necesario decir que éstos han sido procesados mediante una completa interfaz de desarrollo propio escrita en Matlab GUIDE. Esta herramienta, programada de forma modular, permite analizar cualquier estación automática de la AEMET, y provee de soporte completo en el preprocesado, filtrado y representación de resultados. El esfuerzo empleado en el desarrollo pretende facilitar lo máximo posible la aplicación del modelo teórico descrito en el anterior apartado a todas las ciudades objeto de estudio, posibilitando así que otros investigadores continúen el camino emprendido con este proyecto.

La Figura 13 muestra una captura de la interfaz principal, donde aparecen los controles de estación, los parámetros de filtrado y el módulo de representación.

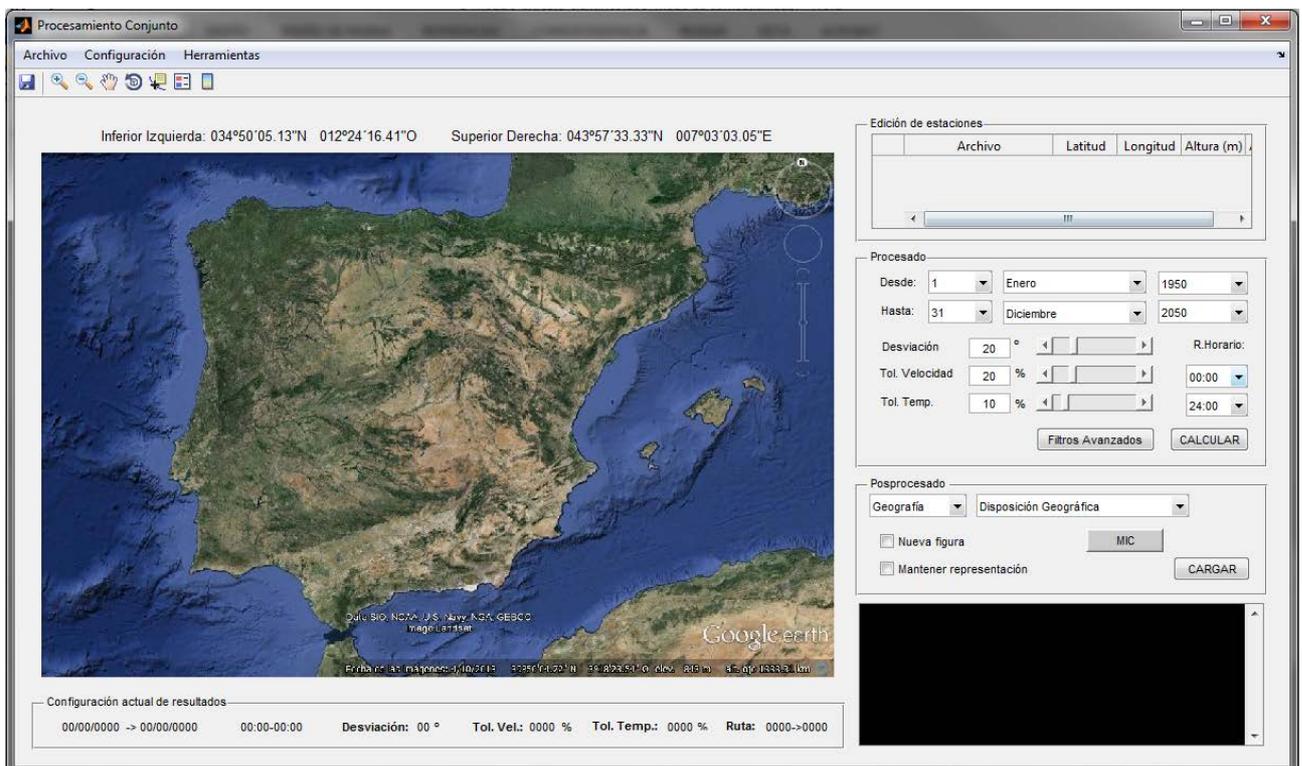


Figura 13: Vista de la interfaz principal de la herramienta de análisis desarrollada

Algunas de las representaciones proporcionadas por el programa son:

- **Análisis de estación individual:** Este tipo de gráficas no considera la interacción con la otra estación. Incluye distribuciones estadísticas, gráficas de interdependencia (ver Figura 14), distribuciones temporales, análisis de condensación gráfica y diagramas direccionales, todo ello aplicado a todas las variables de la estación.
- **Análisis conjunto de estaciones:** Permite el análisis convectivo con todas las variables del problema ya filtradas. Se incluyen distribuciones estadísticas, gráficas de distribución temporal y espacial de eventos

validados, gráficas de análisis general, todas las gráficas de interdependencia entre dos o más variables posibles y una tabla resumen de resultados. La trayectoria asociada a cada evento y la representación de los perfiles y capa límite también está disponible.

El programa también permite el empleo de clúster de computación paralela para el análisis de bases de datos de gran tamaño. Para ello, se ha implementado la *Parallel Computing Toolbox* de Matlab en los cálculos más costosos.

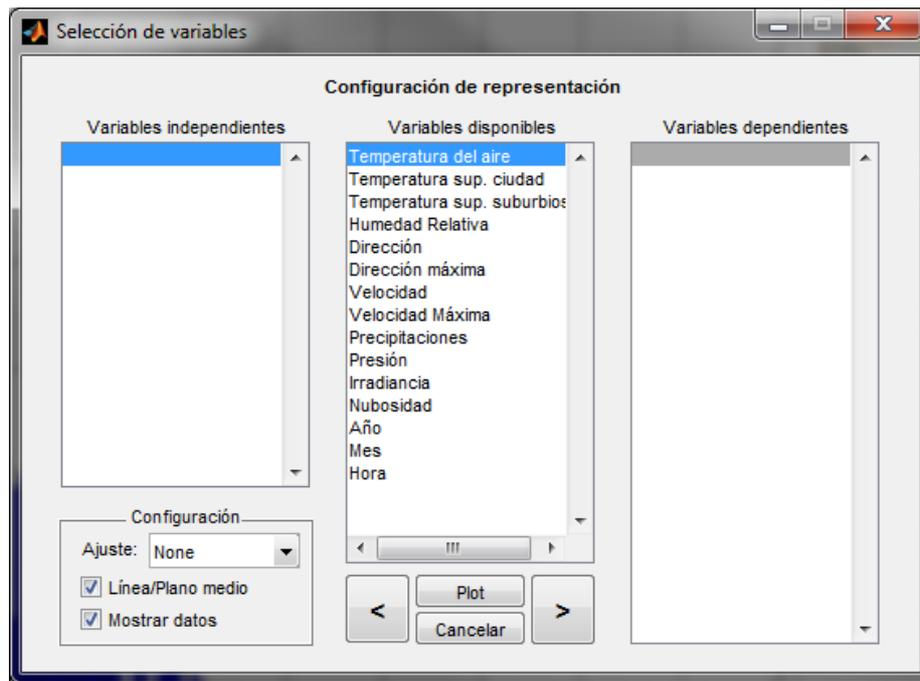


Figura 14: Herramienta de análisis cruzado de variables

## 4 RESULTADOS PARA SEVILLA

Como se ha indicado anteriormente, la ciudad escogida para el análisis es Sevilla. Los motivos que han llevado a la selección de esta ciudad son la gran base de datos disponible, la aparente sencillez de su configuración de estaciones y el conocimiento personal de la zona por parte del autor, muy valioso para esta primera etapa.

Sevilla, capital de Andalucía, es la cuarta ciudad más poblada de España con 693878 habitantes en 2015 [26]. La superficie municipal es de 141.3 Km<sup>2</sup>, lo que resulta en una densidad de población de 4910.67 habitantes/Km<sup>2</sup>. En 2013 un total de 2359 Km<sup>2</sup> estaban dedicados a cultivos agrícolas, mientras que la superficie arbolada ascendía a 811 Km<sup>2</sup> [27].

La población de la ciudad está descendiendo continuamente desde el año 2010 como se muestra en la Figura 13. El consumo eléctrico total en el año 2013 fue de 2584576 MWh, donde el consume doméstico representa el 44%. Un total de 327539 vehículos fueron cuantificados en el año 2014 [27].

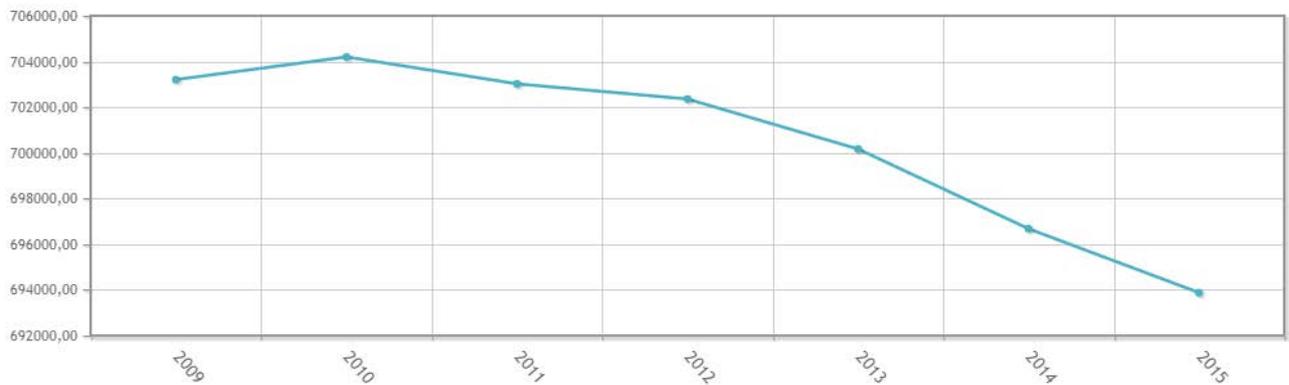


Figura 15: Población de Sevilla en el período bajo estudio. Extraído de [26]

#### 4.1. Instrumentación:

El período bajo estudio abarca desde el 20/10/2009 hasta el 05/11/2015. La red de medición está compuesta por dos estaciones instaladas en el aeropuerto de San Pablo (37°25'00''N, 5°52'45''O) y en la base aérea de Tablada (37°21'51''N, 6°00'21''O). Ambos puntos están separados 12.4 Km. Las revisiones y calibraciones de los instrumentos son frecuentes por su gran importancia en la gestión del tráfico aéreo de la zona, por lo que los errores asociados a la calibración parecen improbables.

Estación de San Pablo: Está situada junto a la pista del aeropuerto de Sevilla, y la rodea una escasa vegetación. No hay grandes obstáculos ni masas de agua en el entorno, tan solo pequeños edificios y una acequia de regadío, ambos situados a varios cientos de metros.

Los instrumentos de medición quedan recogidos en la Tabla 2, donde se observan unos valores muy elevados de tolerancia para los medidores de humedad y dirección.

Tabla 2: Relación de instrumentos de la estación de San Pablo (Sevilla). Datos cortesía de la AEMET

VARIABLE	INSTRUMENTO	UNIDADES	TOLERANCIA
<b>Dirección</b>	Vaisala WAA151	°	10
<b>Velocidad</b>	Vaisala WAA151	m/s	0.1
<b>Humedad</b>	Vaisala HMP45D	%	1
<b>Precipitaciones</b>	N/A	mm	0.1
<b>Presión</b>	-	hPa	1
<b>Temperatura</b>	Vaisala HMP45D	°C	0.1

Estación de Tablada: Está situada dentro de la base aérea de Morón, en un entorno mucho más rugoso que la anterior estación y con varios obstáculos cercanos, aunque no interfirieran en la línea de unión de las estaciones. Adicionalmente, una gran masa de agua (el río Guadalquivir) queda a una distancia moderada de su ubicación.

Los instrumentos de medición quedan recogidos en la Tabla 3, donde valores más bajos de tolerancia quedan recogidos. Los datos de presión no están disponibles, por lo que deben ser adaptados mediante correlación ISA desde la estación de San Pablo.

Tabla 3: Relación de instrumentos de la estación de Tablada (Sevilla). Datos cortesía de la AEMET

VARIABLE	INSTRUMENTO	UNIDADES	TOLERANCIA
<b>Dirección</b>	Thies 4.3129.60.150	°	1
<b>Velocidad</b>	Thies 4.3519.00.150	m/s	0.1
<b>Humedad</b>	Thies 1.1005.45.150	%	0.1
<b>Precipitaciones</b>	N/A	mm	0.1
<b>Presión</b>	-	-	-
<b>Temperatura</b>	Thies 1.1005.45.150	°C	0.1

## 4.2 Selección de filtros, parámetros de temperatura superficial y parámetros de rugosidad:

El proceso de filtrado debe basarse en una solución de compromiso entre el número y la precisión de eventos filtrados. Así, dada la gran distancia que separa las estaciones bajo estudio, se descartan los filtros de turbulencia, pues son altamente restrictivos a bajas altitudes (debido a la alta heterogeneidad de la Subcapa Rugosa), y se toma una tolerancia de rumbo elevada para abarcar toda la ciudad. La configuración final seleccionada queda recogida en la Tabla 4.

Se obtienen con ello 141 eventos desde San Pablo hasta Tablada (0.05%) y 80 en la dirección opuesta (0.03%). Las restricciones de velocidad y dirección eliminaron el 83.6% de los registros, las de nubosidad el 15.7% y las de temperatura superficial el 0.03%.

Tabla 4: Relación de filtros para el análisis de Sevilla

<b>FILTRO</b>	<b>VALOR</b>
<b>Rango de datos</b>	Todo
<b>Correcciones T/P ISA</b>	Sí
<b><math>\delta T</math></b>	5%
<b><math>\delta V</math></b>	15%
<b><math>\delta VV</math></b>	N/A
<b><math>\delta C</math></b>	22°
<b><math>\delta \xi</math></b>	N/A
<b><math>\delta L</math></b>	N/A
<b>P1-P2</b>	[0,0]
<b>N1-N2</b>	[0,50%]

Los materiales escogidos, su color y la tolerancia empleada en el análisis quedan recogidos en la Tabla 5. Todos ellos han sido obtenidos mediante selección de muestras en la imagen y el posterior ajuste de la tolerancia. El mapa de detección resultante y la distribución en representación RGB pueden consultarse en la Figura 16 y la Figura 17, respectivamente.

Tabla 5: Propiedades de los materiales para en análisis del mapa de Sevilla

Material	Emisividad	Absortividad	Color RGB	Tolerancia	Extensión
Asfalto	0.95	0.85	[142,143,138]	15	6.4%
Ladrillo rojo	0.93	0.75	[158,140,134]	20	18.3%
Suelo arcilloso	0.92	0.75	[156,133,103]	22	15.8%
Hormigón	0.94	0.65	[175,176,170]	30	11.6%
Vegetación	0.97	0.05	[76,92,81]	26	7.0%
Agua	0.91	0.025	[115,132,110]	14	2.9%

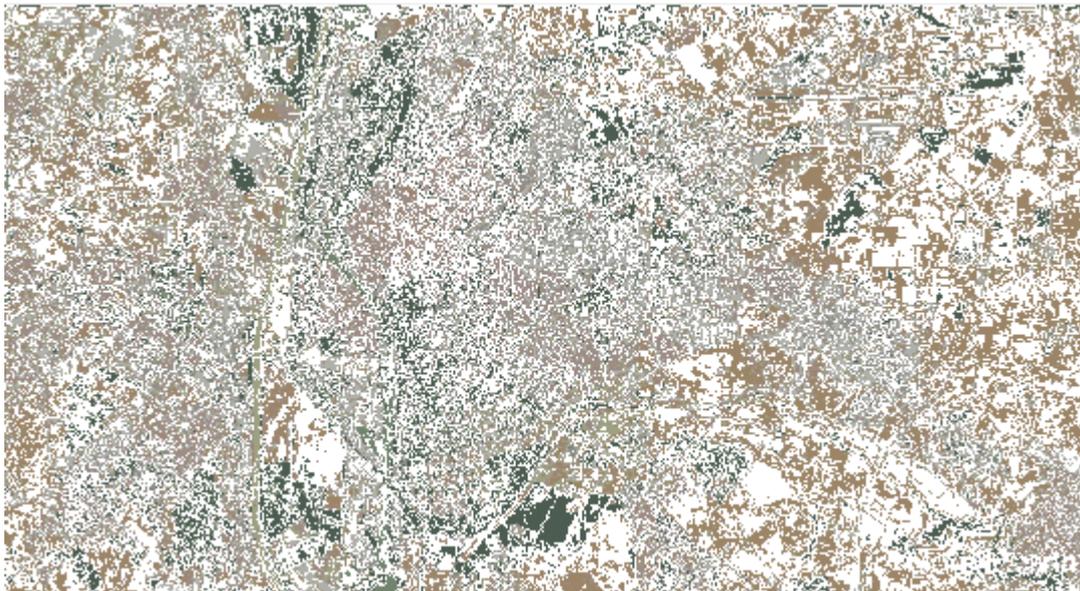


Figura 16: Mapa de detección de materiales de Sevilla por color. Las zonas en blanco no están clasificadas

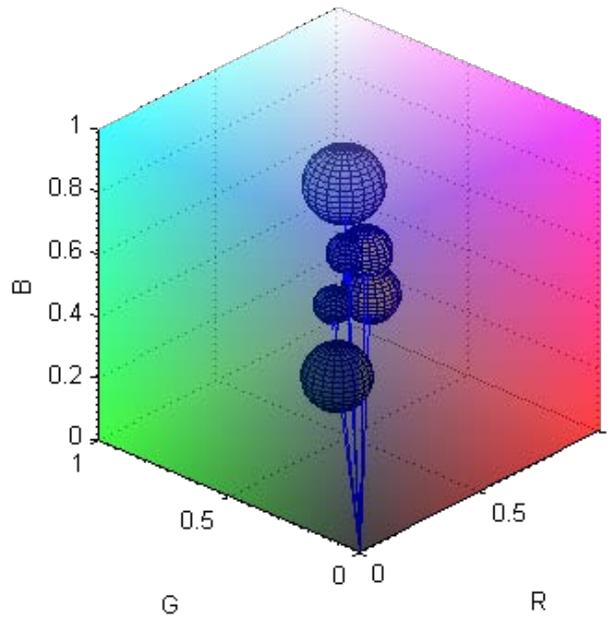


Figura 17: Representación en el espacio RGB de los colores de materiales y su tolerancia (esfera)

Finalmente, los parámetros de rugosidad han sido determinados mediante el procedimiento previamente detallado, cuya gráfica de ajuste queda recogida en la Figura 18. Atendiendo a la baja rugosidad superficial de la zona previa a San Pablo, se ha tomado un  $Z_1 = 0.2$  m (rugosidad previa al aeropuerto) lo que conlleva un  $Z_2 = 1$  m y un  $Z_3 = 1.05$  m.

Como se puede observar, este procedimiento reporta valores anormalmente bajos de rugosidad. Debido a la configuración matemática de la Teoría de Monin-Obukhov, los valores no pueden ser mayores pues están limitados indirectamente por la altura de la estación. Consecuentemente, para el set de estaciones de Sevilla, no se debe esperar una buena predicción de los perfiles.

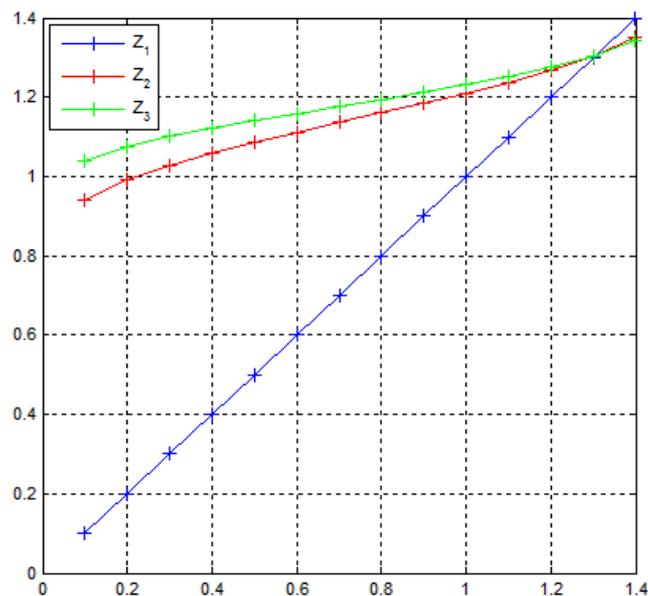


Figura 18: Gráfica de estimación de rugosidades para el set experimental de Sevilla

### 4.3. Resultados

El elevado número de variables del problema, sus complejas relaciones de interdependencia y la necesidad de disponer de métodos generales de representación motivan el uso de estrategias de condensación de datos. Así, se decide desarrollar un mapa bidimensional de coeficientes de correlación de Pearson que relacione todas las variables de interés tras el proceso de filtrado. Este mapa se representa en la Figura 19 y en la Figura 20 para los casos de San Pablo – Tablada y Tablada – San Pablo, respectivamente.

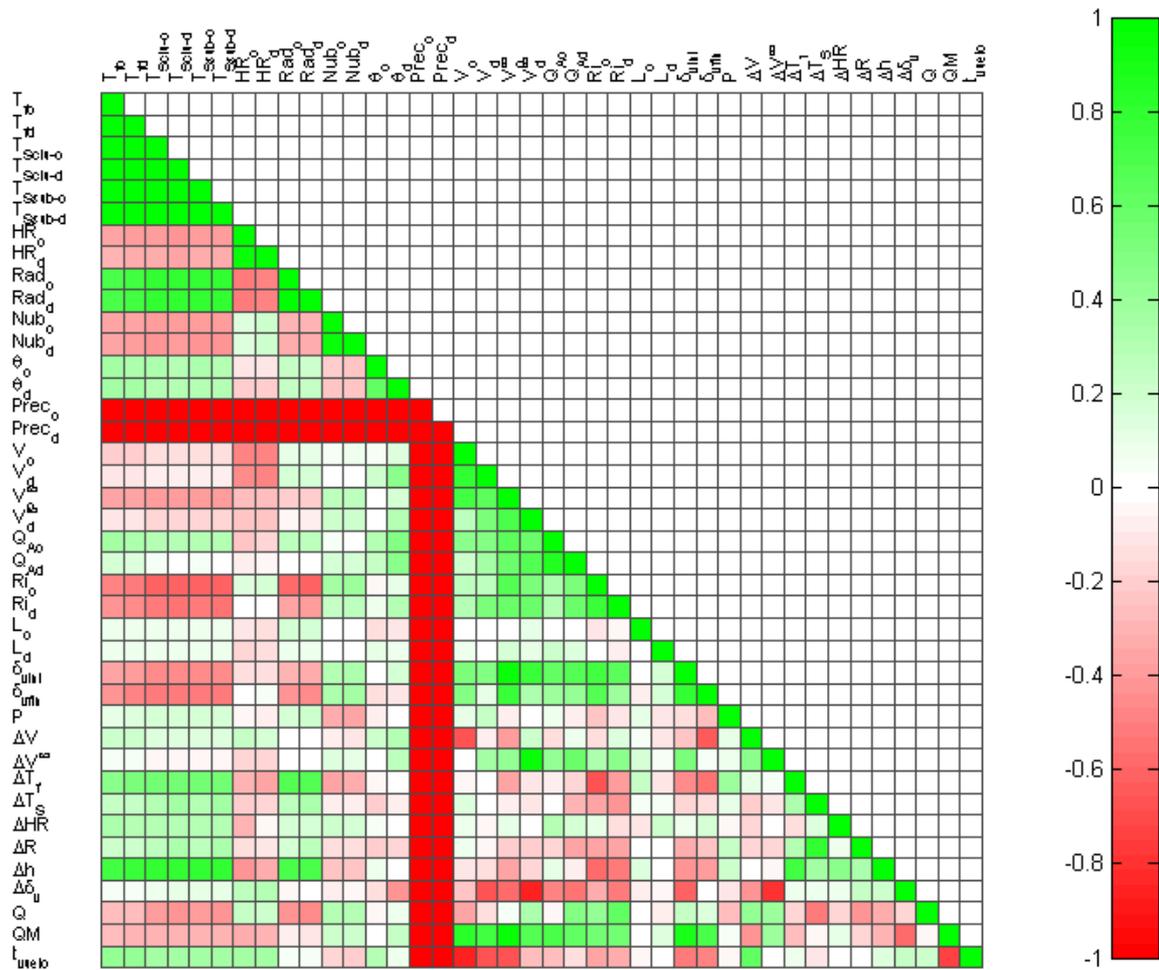


Figura 19: Mapa de correlación de Pearson para las variables de los eventos filtrados desde San Pablo hasta Tablada

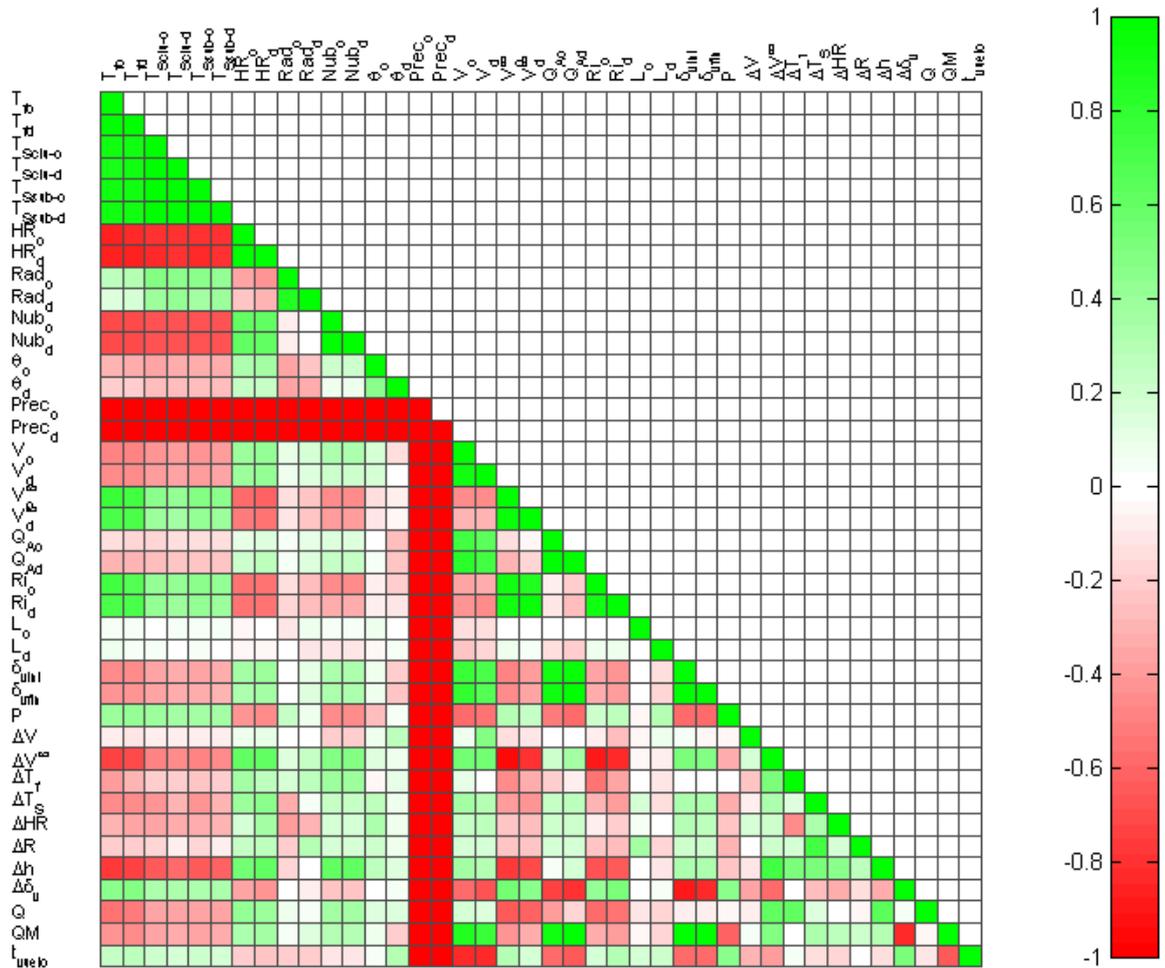


Figura 20: Mapa de correlación de Pearson para las variables de los eventos filtrados desde Tablada hasta San Pablo

El estudio de la enorme variedad de relaciones que muestran las Figuras 17 y 18 queda fuera del alcance de este documento, aunque sí se ha realizado durante la investigación. Solo aquellas gráficas que han llevado a las conclusiones expuestas en los próximos apartados han sido añadidas, y serán explicadas en la discusión. Respecto a los resultados generales, se han calculado los incrementos medios de temperatura, humedad relativa, entalpía, y calor, recogidos en la Tabla 6.

Tabla 6: Resultados medios para el conjunto de estaciones de Sevilla

Ruta	$\Delta T$ (K)	$\Delta HR$ (%)	$\Delta h$ (Kj/Kg)	$\Delta QA$ (KW)
<b>San Pablo - Tablada</b>	0.16552	1.6794	1.5284	-6.5206 e+07
<b>Tablada – San Pablo</b>	0.2300	-3.3088	-1.8155	-1.5489 e+08

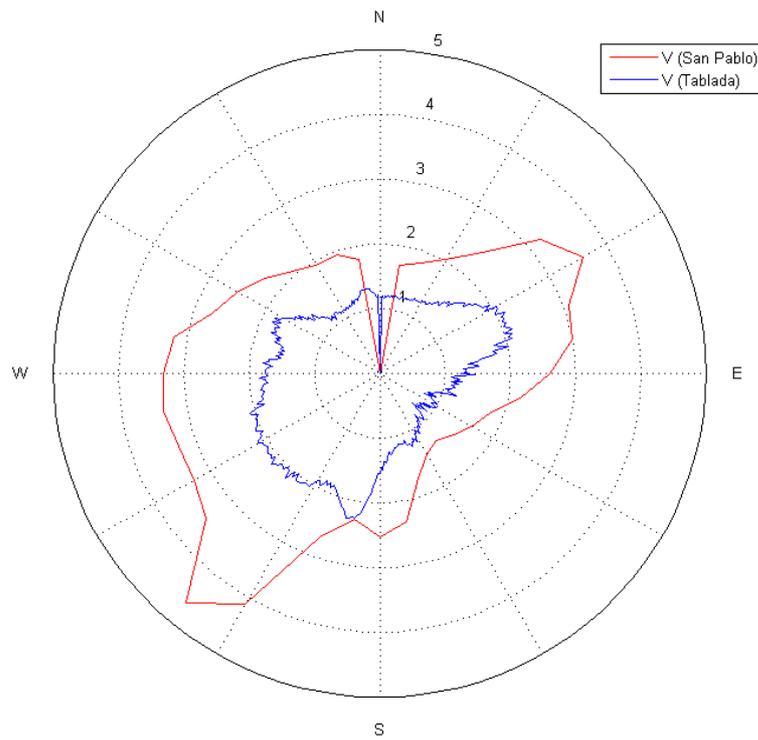


Figura 21: Representación direccional de velocidades en ambas estaciones para la muestra completa

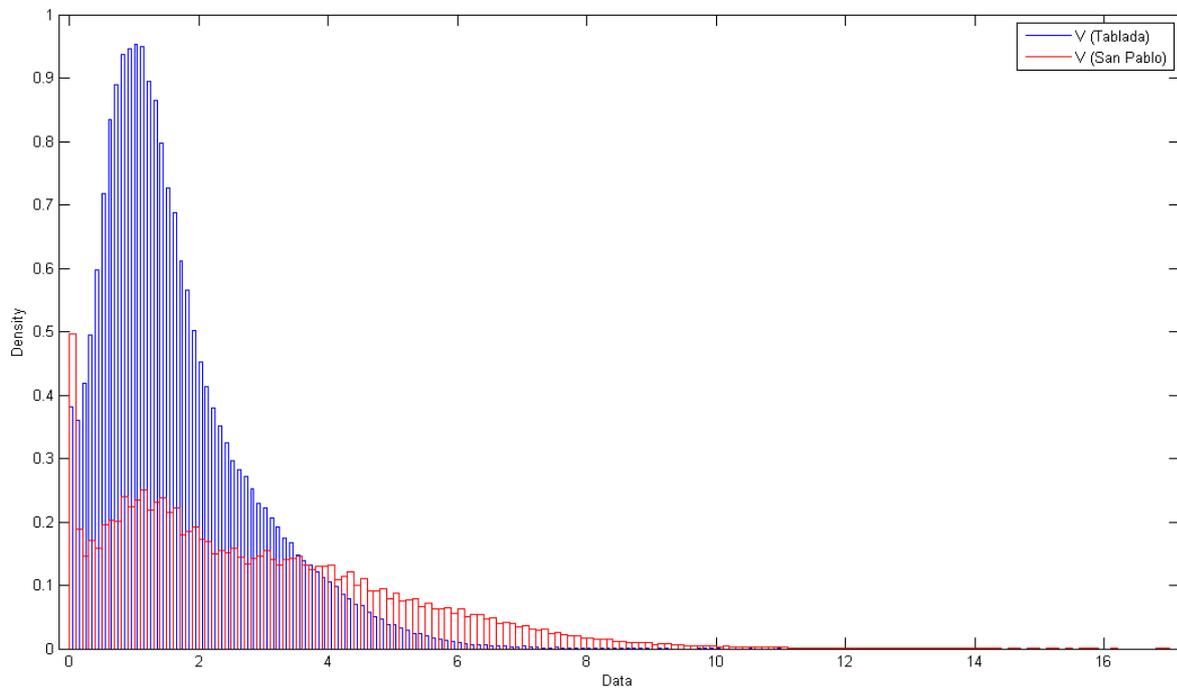


Figura 22: Distribución estadística de la muestra completa de velocidades para ambas estaciones

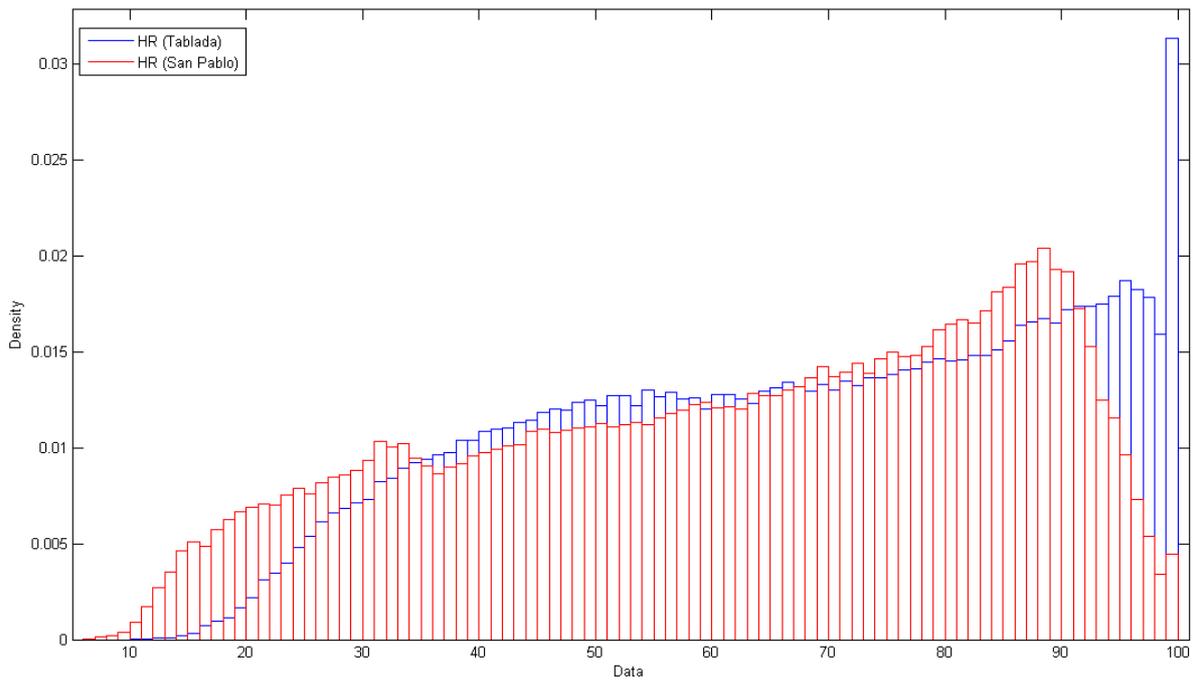


Figura 23: Distribución estadística de la muestra completa de humedad relativa para ambas estaciones

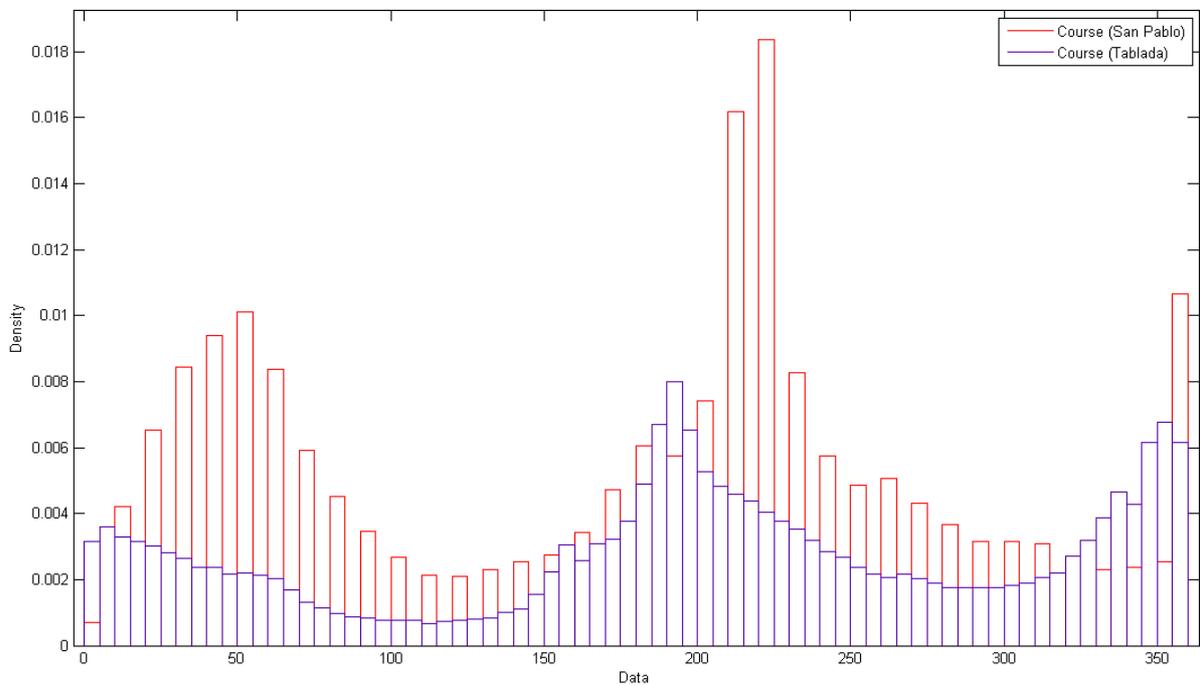


Figura 24: Distribución estadística de la muestra completa de direcciones de viento. Nótese el efecto de las diferentes tolerancias en la discretización

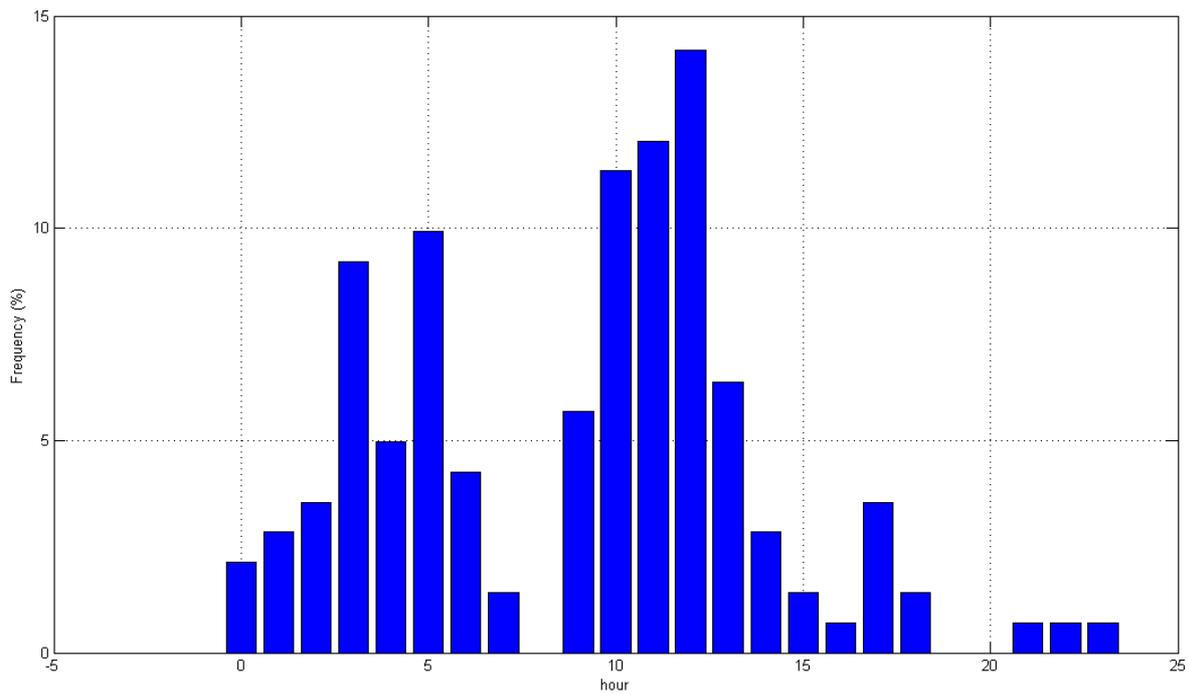


Figura 25: Distribución horaria de eventos filtrados desde San Pablo hasta Tablada

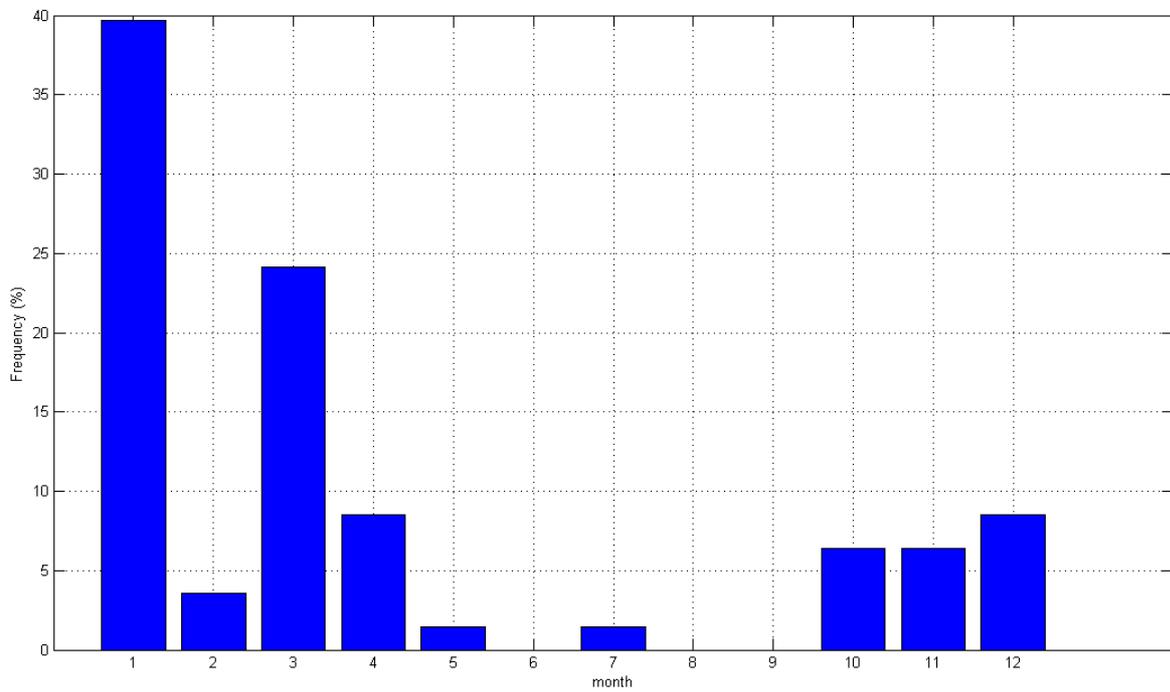


Figura 26: Distribución mensual de eventos filtrados desde San Pablo hasta Tablada

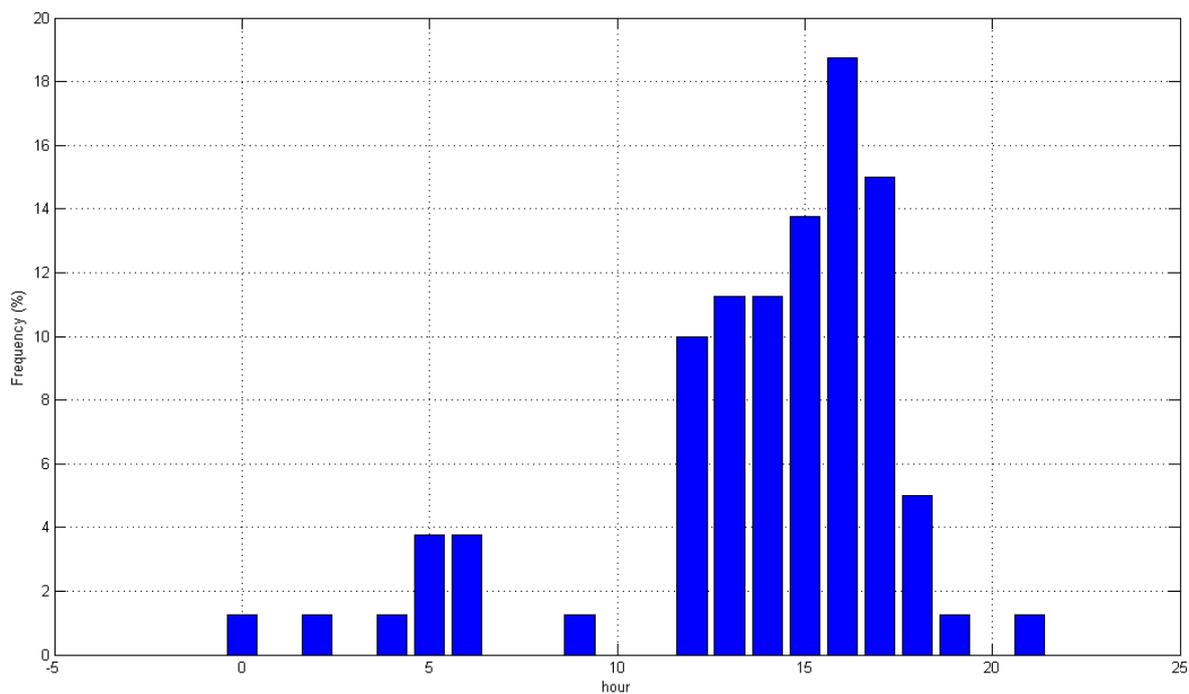


Figura 27: Distribución horaria de eventos filtrados desde Tablada hasta San Pablo

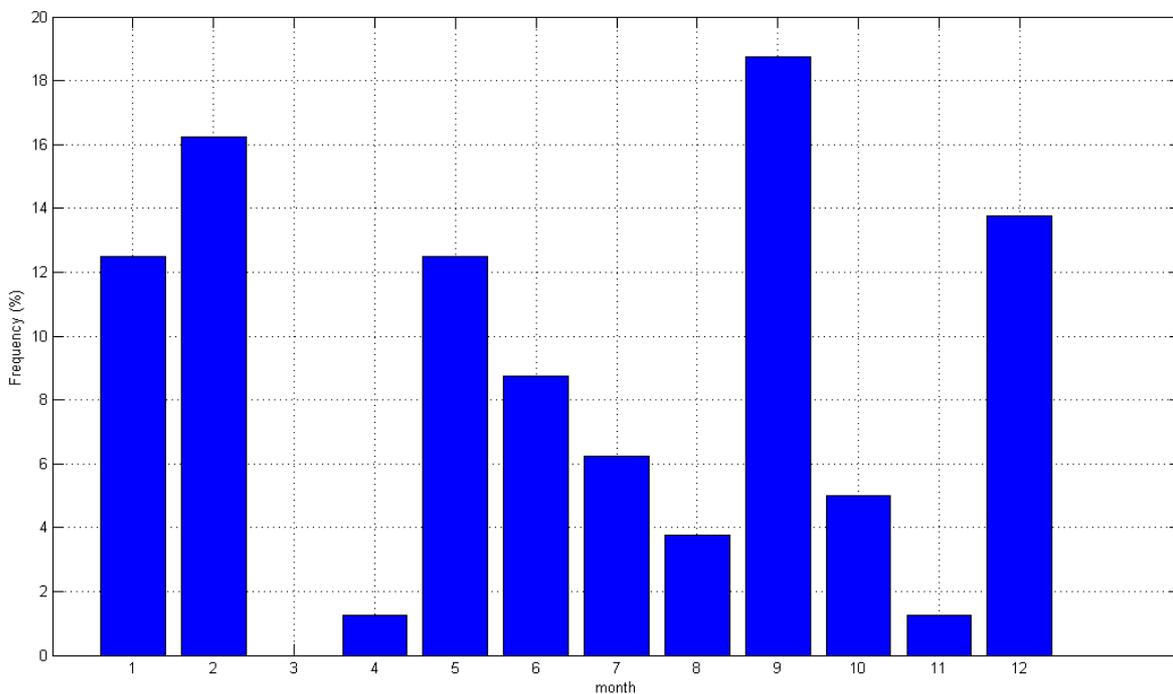


Figura 28: Distribución mensual de eventos filtrados desde Tablada hasta San Pablo

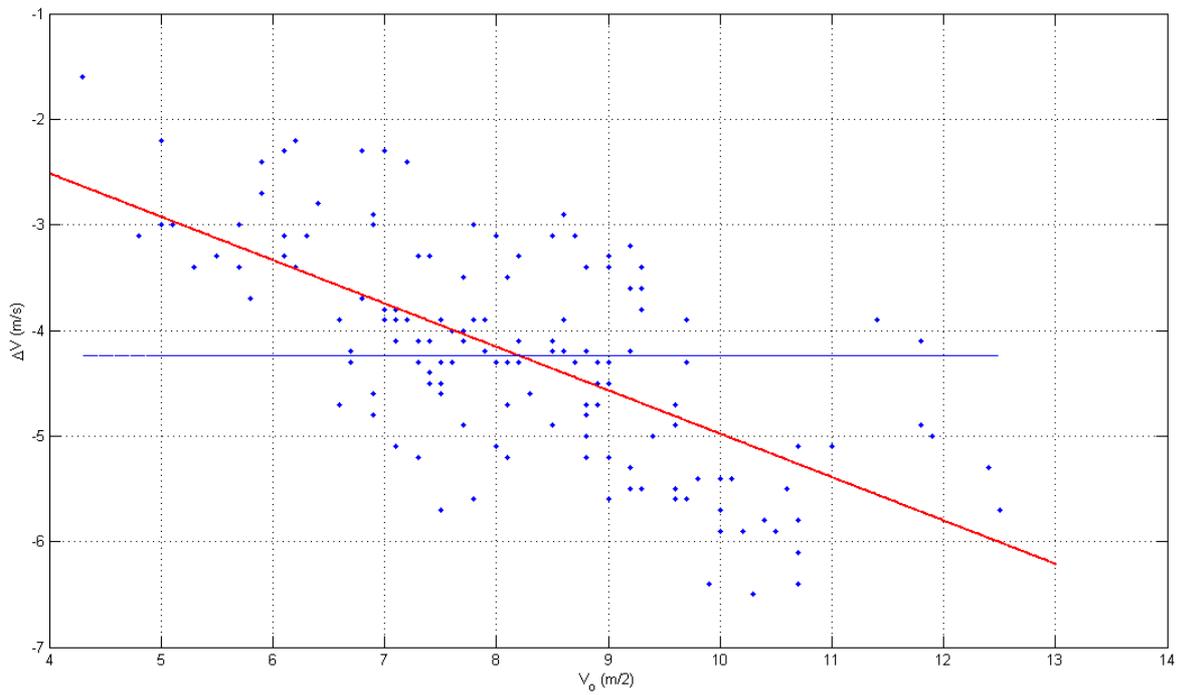


Figura 29: Incremento de velocidad frente a velocidad en origen para el análisis San Pablo - Tablada.  $R^2 = 0.4425$

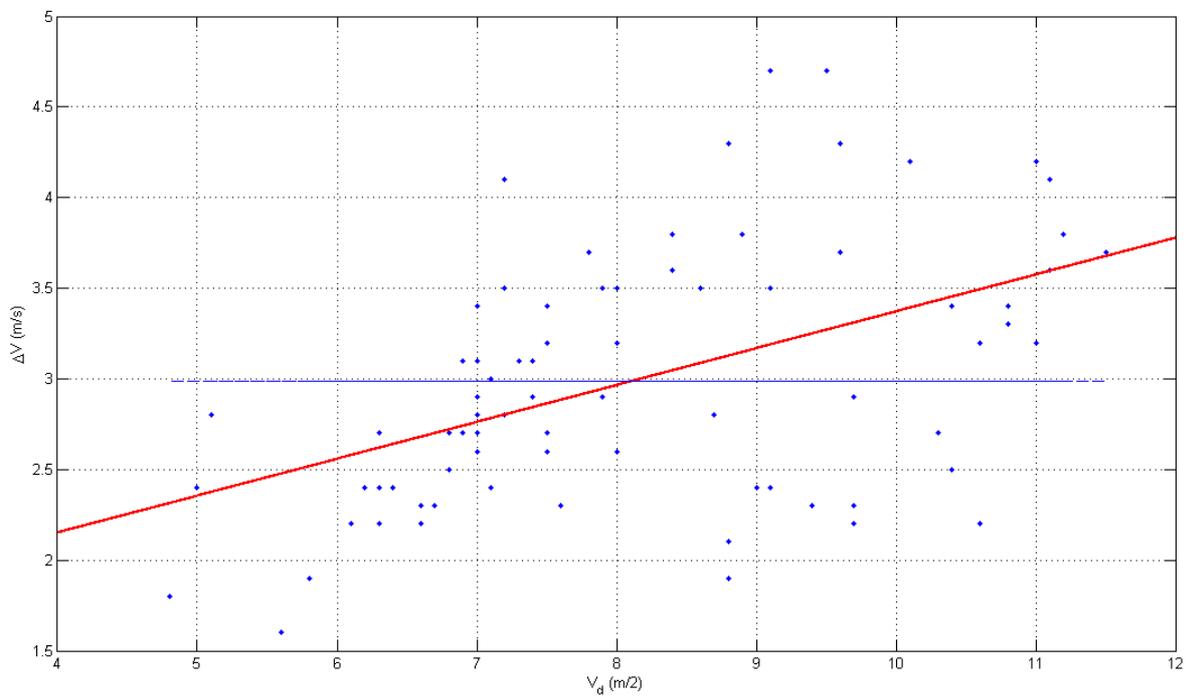


Figura 30: Incremento de velocidad frente a velocidad en origen para el análisis Tablada - San Pablo.  $R^2 = 0.2414$

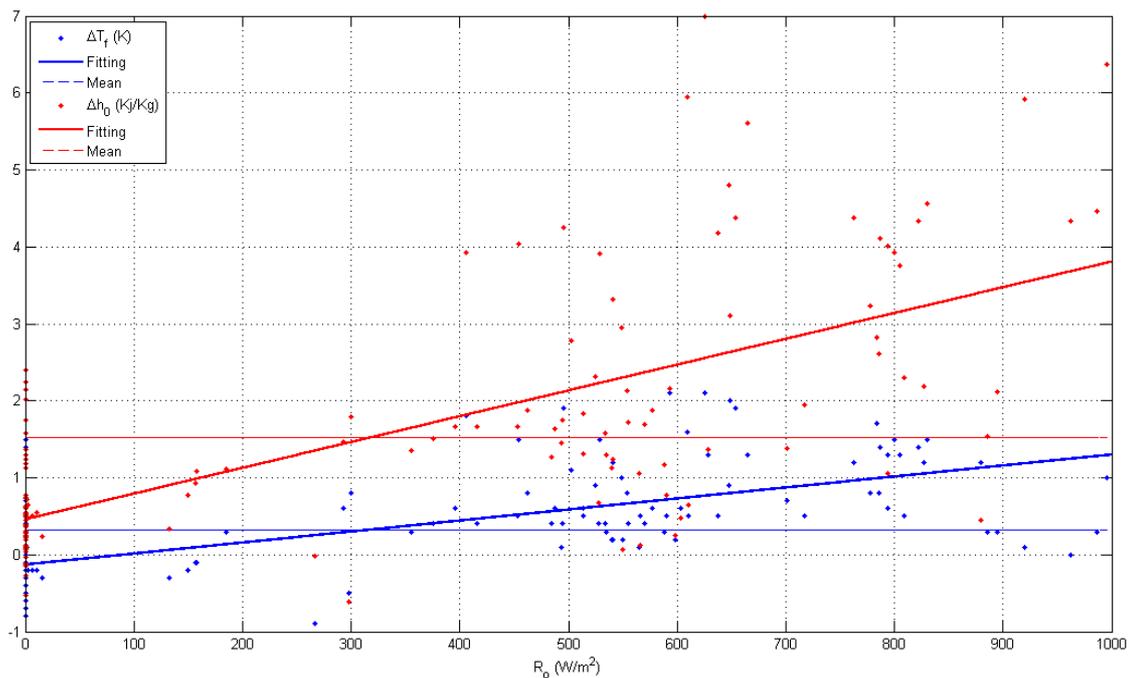


Figura 31: Incrementos de temperatura y entalpía frente a radiación en origen para el análisis San Pablo – Tablada.  $R^2$  ( $\Delta T$ ) = 0.4458,  $R^2$  ( $\Delta h$ ) = 0.4789

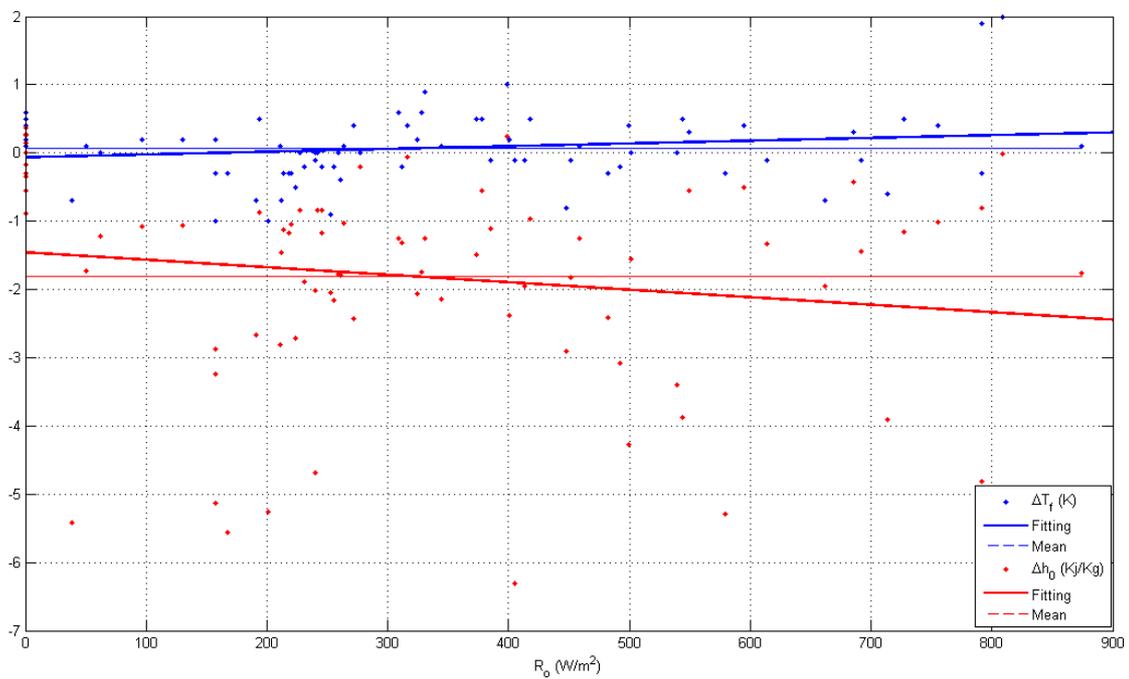


Figura 32: Incrementos de temperatura y entalpía frente a radiación en origen para el análisis Tablada – San Pablo.  $R^2$  ( $\Delta T$ ) = 0.0191,  $R^2$  ( $\Delta h$ ) = 0.0261

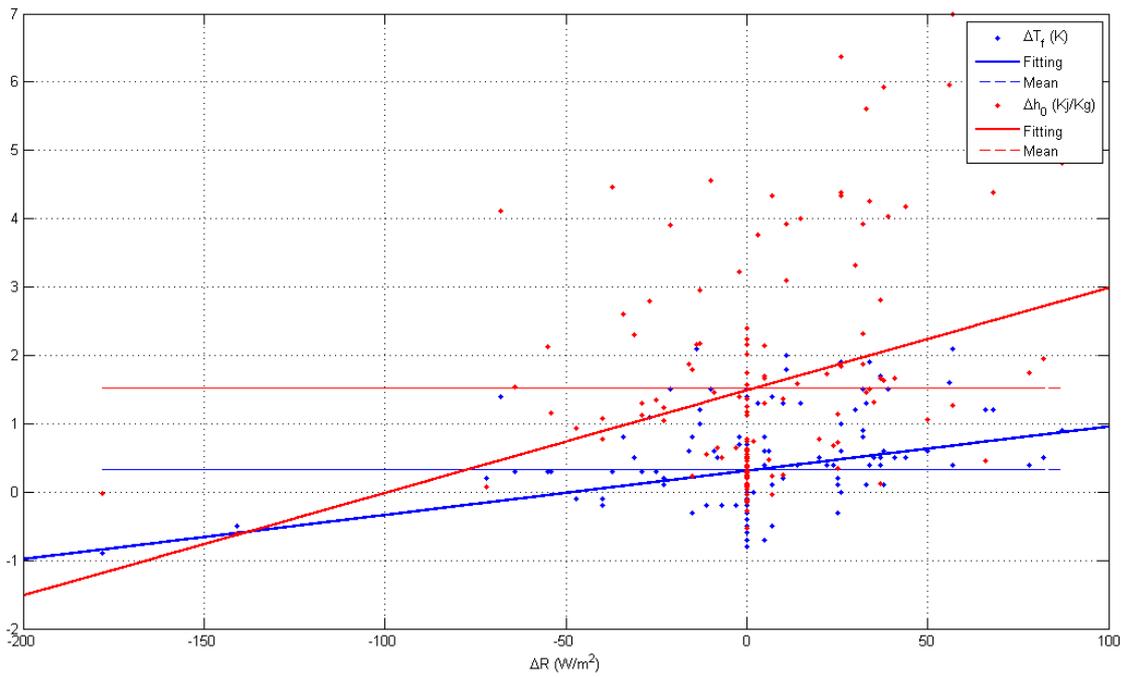


Figura 33: Incrementos de temperatura y entalpía frente a la variación de irradiancia durante el tiempo de vuelo para el análisis San Pablo – Tablada.  $R^2$  ( $\Delta T$ ) = 0.0946,  $R^2$  ( $\Delta h$ ) = 0.0996

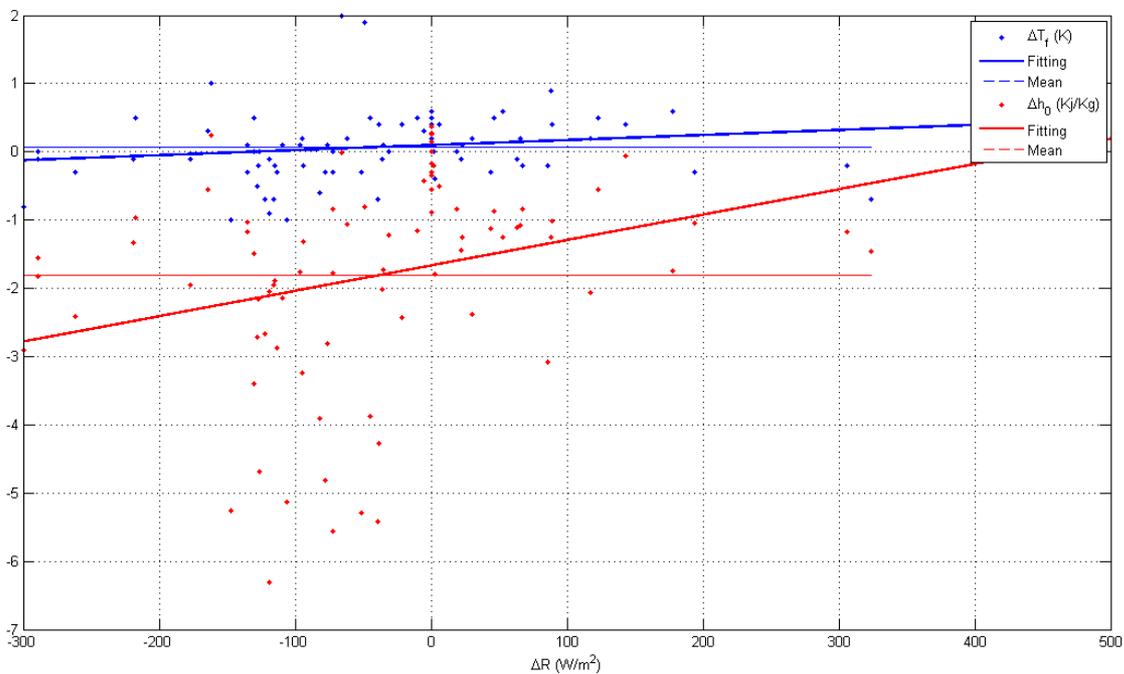


Figura 34: Incrementos de temperatura y entalpía frente a la variación de irradiancia durante el tiempo de vuelo para el análisis Tablada – San Pablo.  $R^2$  ( $\Delta T$ ) = 0.0274,  $R^2$  ( $\Delta h$ ) = 0.0662

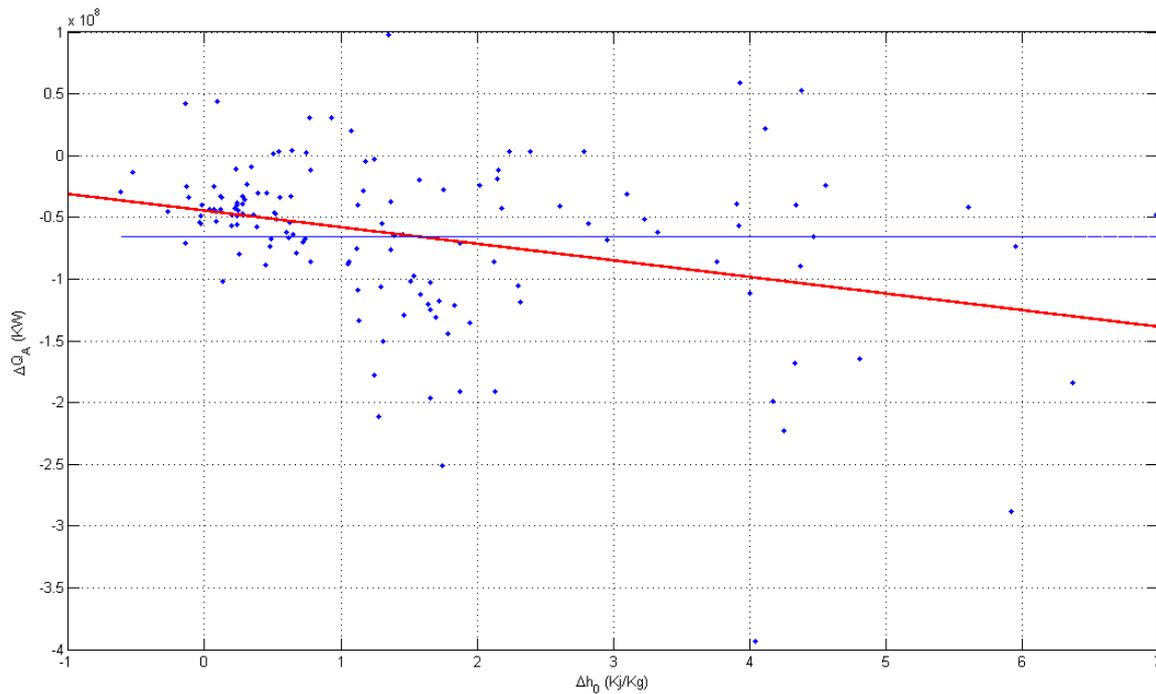


Figura 35: Flujo advectivo de calor frente al incremento de entalpía medido para el análisis San Pablo - Tablada.  $R^2 = 0.1015$

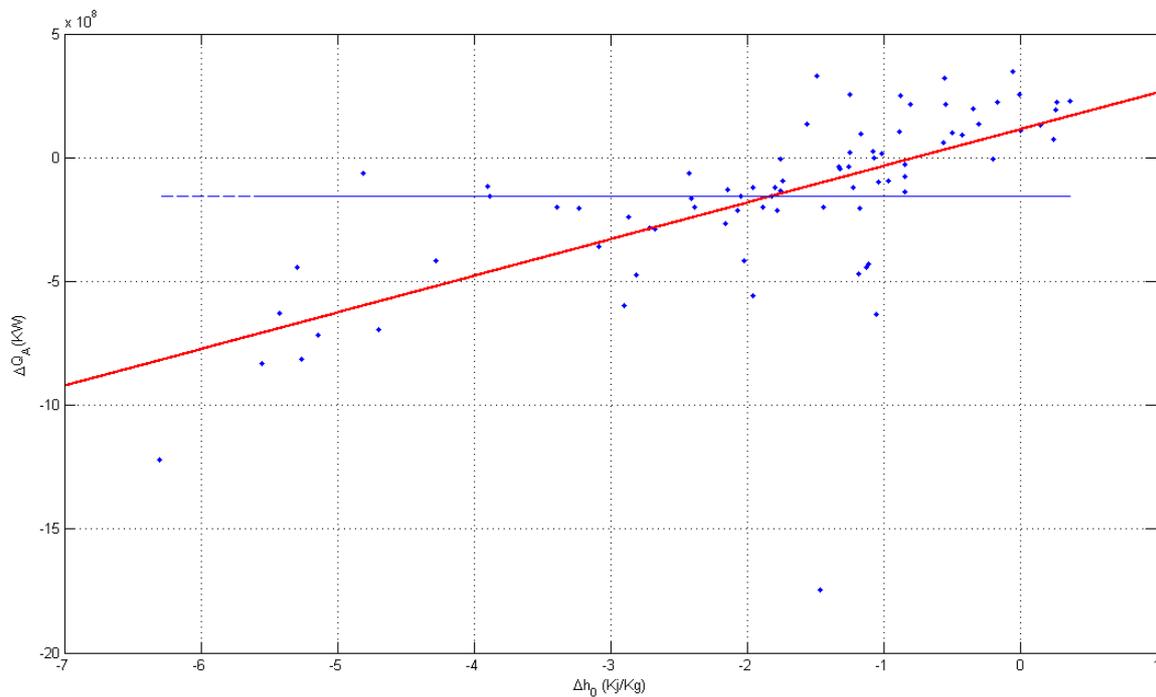


Figura 36: Flujo advectivo de calor frente al incremento de entalpía medido para el análisis Tablada- San Pablo.  $R^2 = 0.4247$

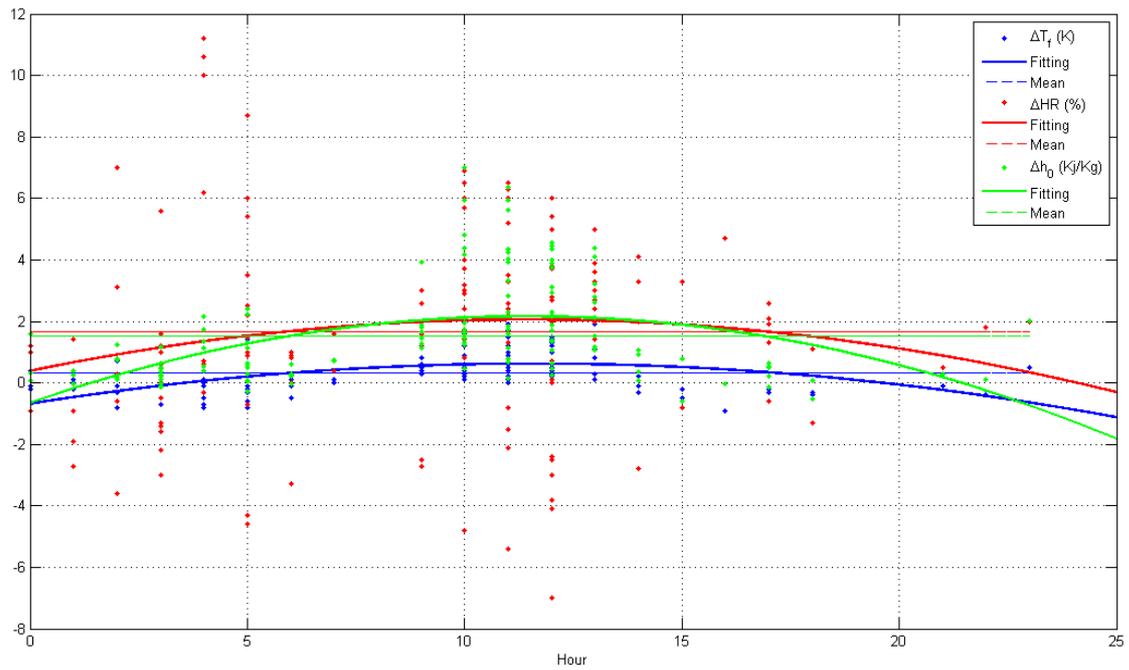


Figura 37: Incrementos de temperatura, humedad y entalpía medidos como función de la hora de inicio del evento para el análisis San Pablo - Tablada.  $R^2$  ( $\Delta T$ ) = 0.2620,  $R^2$  ( $\Delta HR$ ) = 0.0215,  $R^2$  ( $\Delta h$ ) = 0.2401

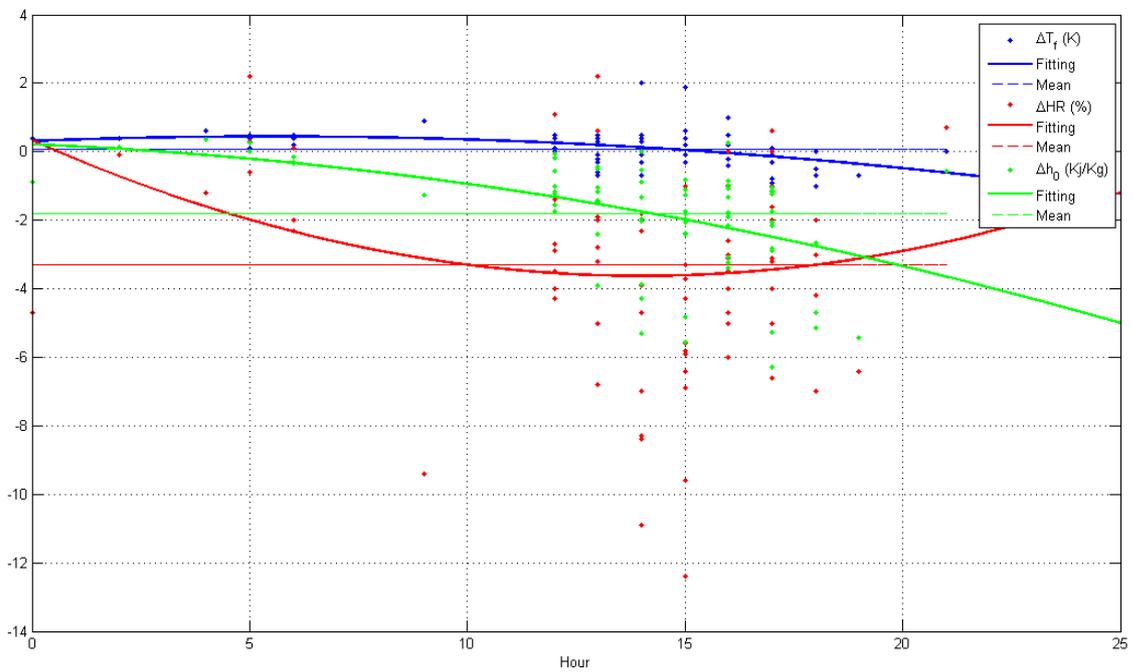


Figura 38: Incrementos de temperatura, humedad y entalpía medidos como función de la hora de inicio del evento para el análisis Tablada - San Pablo.  $R^2$  ( $\Delta T$ ) = 0.1620,  $R^2$  ( $\Delta HR$ ) = 0.0530,  $R^2$  ( $\Delta h$ ) = 0.2407

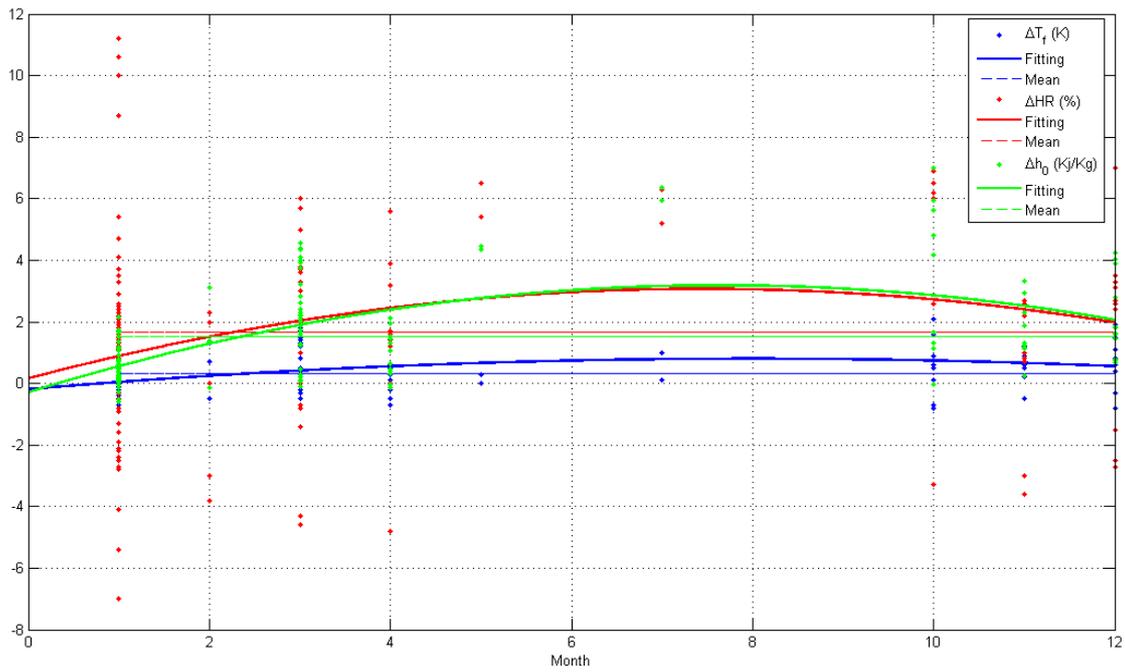


Figura 39: Incrementos de temperatura, humedad y entalpía medidos como función del mes de inicio del evento para el análisis San Pablo - Tablada.  $R^2 (\Delta T) = 0.1343$ ,  $R^2 (\Delta HR) = 0.0490$ ,  $R^2 (\Delta h) = 0.2933$

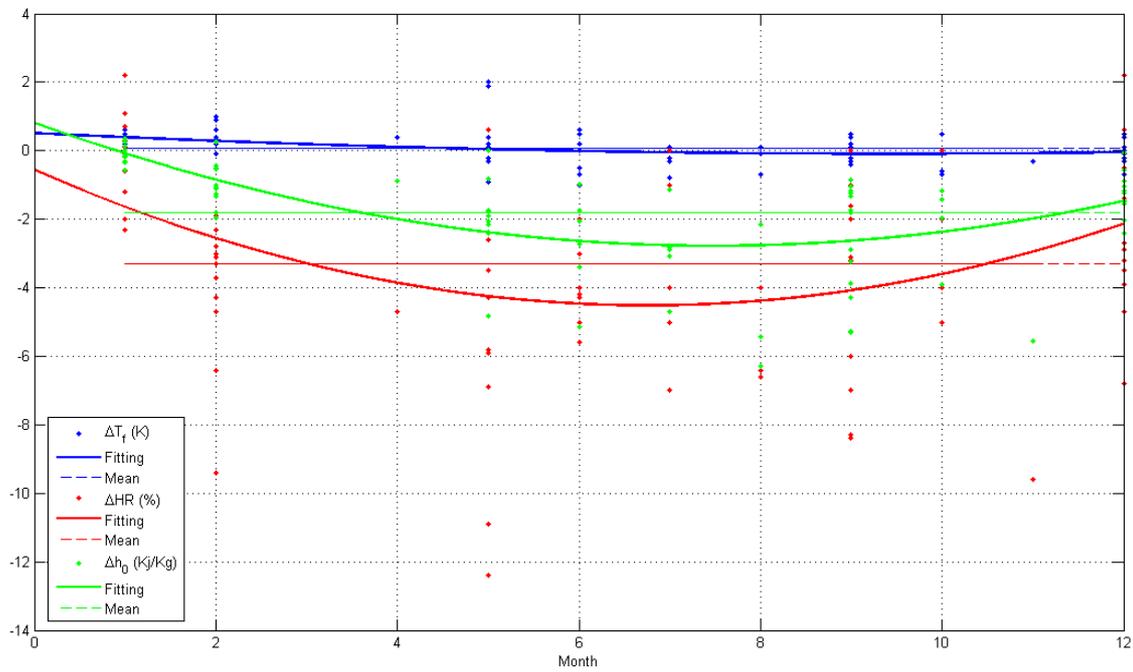


Figura 40: Incrementos de temperatura, humedad y entalpía medidos como función del mes de inicio del evento para el análisis Tablada - San Pablo.  $R^2 (\Delta T) = 0.1158$ ,  $R^2 (\Delta HR) = 0.1327$ ,  $R^2 (\Delta h) = 0.3699$

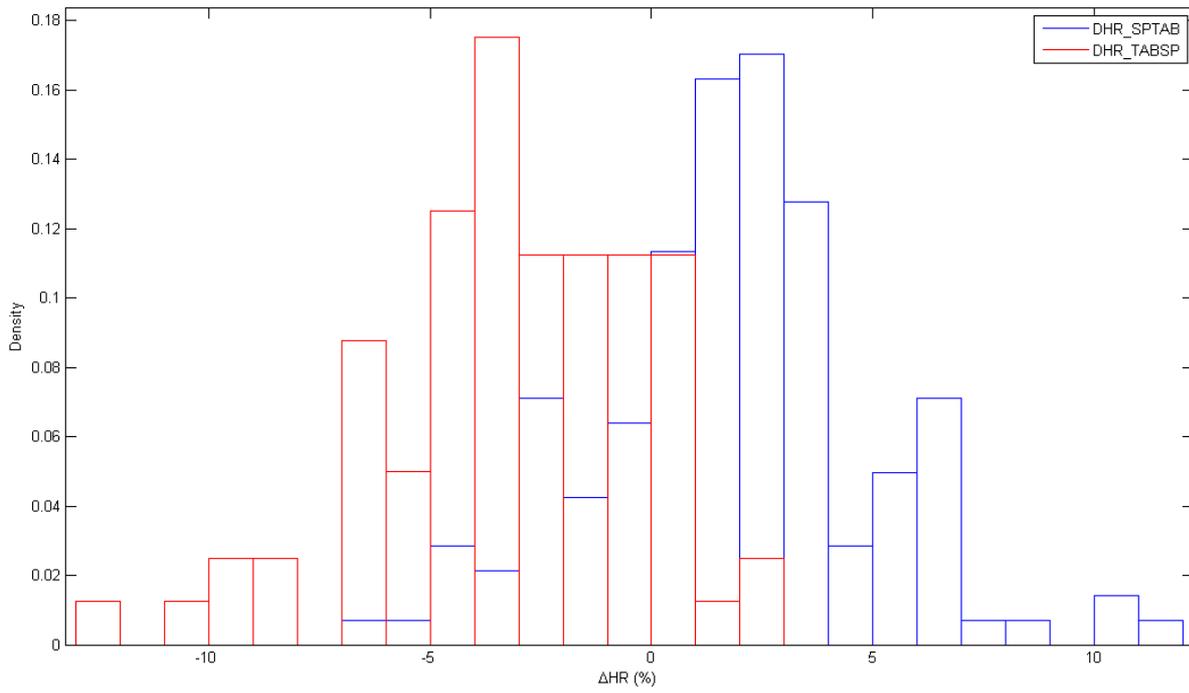


Figura 41: Distribución estadística de la variación de humedad para ambos análisis

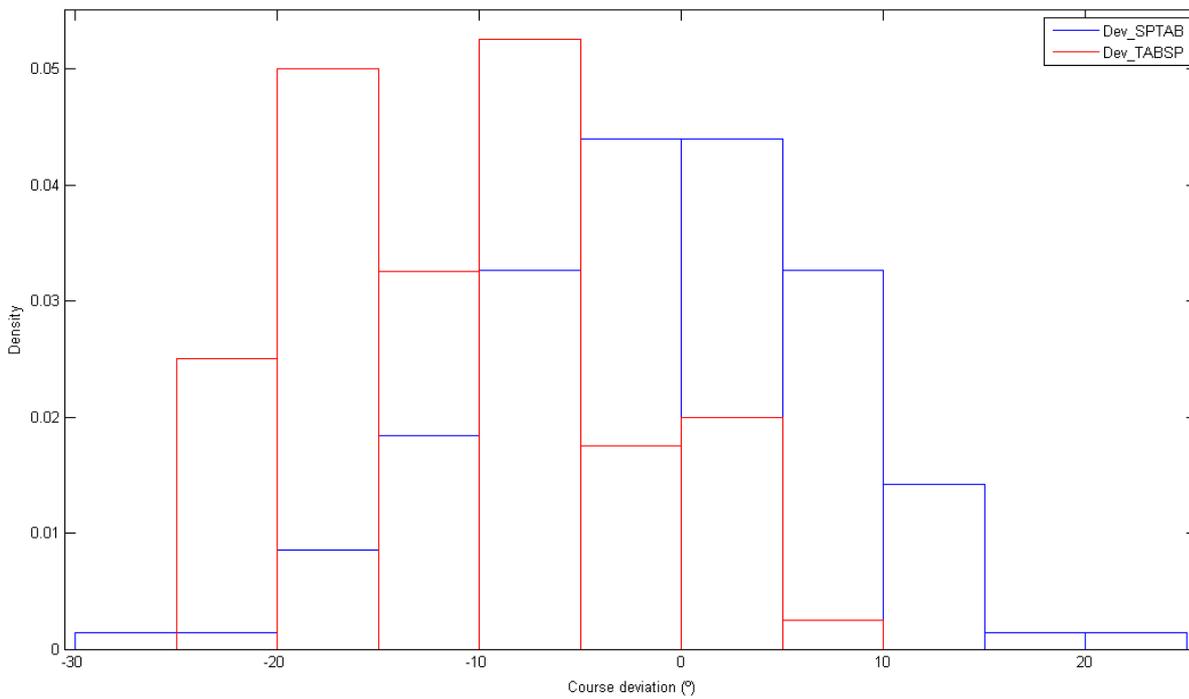


Figura 42: Distribución estadística de la desviación de la corriente para ambas estaciones

## 4.4 Discusión de resultados

Los resultados anteriores confirman con claridad las sospechas de que el entorno tiene un enorme efecto en los resultados medidos. Así, la Figura 21 denota una importante y sistemática pérdida de velocidad en la estación de Tablada con respecto a San Pablo. Las distribuciones estadísticas de velocidad de la Figura 22 complementan a las anteriores y asocian las medidas de Tablada a velocidades intermedias, mientras que las de San Pablo gozan de más registros con marcas de 4 m/s o superior. Las relaciones entre incrementos de velocidad durante el tiempo de vuelo y velocidad en origen mostradas en la Figura 29 y la Figura 30 apuntan a una pérdida lineal de velocidad entre estaciones. Esta linealidad, aunque dotada de una significativa dispersión, es coherente con la modelización logarítmica de los perfiles de velocidad.

La influencia del Guadalquivir en la estación de Tablada se percibe con claridad en la Figura 23, donde las densidades de valores elevados de humedad son mucho mayores que en la otra estación. La Figura 41 demuestra la repercusión de este hecho en el análisis convectivo al desplazar las distribuciones de incremento de humedad según la dirección.

Un resultado inesperado se puede observar en la Figura 24, donde se representan las distribuciones estadísticas de la dirección del viento. Dejando de lado el efecto acumulador en la densidad asociado a la mayor tolerancia del instrumento de San Pablo, se percibe con claridad un desfase entre ambas medidas. Un error de calibración o equilibrado podría ser una causa sencilla de este efecto, pero resultaría insólito en dos estaciones que son calibradas por expertos cada pocos meses. Asumiendo que dicho error no existe, los resultados podrían apuntar a una sistemática desviación del flujo de aire cuando atraviesa la ciudad, hipótesis que parece apoyar la Figura 42.

Las Figuras Figura 25 a Figura 28 inauguran el juego de gráficas de los eventos ya filtrados. Un efecto inesperado es detectado: Los periodos fríos favorecen la adquisición de datos desde San Pablo hasta Tablada, mientras que los cálidos son característicos de la dirección opuesta. Una sencilla explicación física puede encontrarse en los ciclos de convección entre el mar y la tierra, pues si durante el día la brisa va tierra adentro, durante la noche sucede lo contrario. Debido a la orientación NE-SW de la línea de unión entre estaciones, este hecho tiene una gran repercusión.

Aunque todos los anteriores comentarios ayudan a comprender los efectos del entorno en el modelo, su validación llega en las Figuras Figura 31 a Figura 34. En efecto, en las Figuras Figura 31 y Figura 32 se observa una clara correlación positiva entre el incremento de temperatura y la radiación solar en el instante inicial. Esto indica que el sistema es capaz de percibir los incrementos de temperatura del aire cuando sobrevuela la ciudad, lo que parece validar el proceso de filtrado de datos. Se podría argumentar que lo que verdaderamente se está midiendo es la variación de temperatura local de cada estación. Con el objetivo de descartar esta hipótesis se representan las Figuras 33 y 34, en las que se muestra una correlación casi inexistente entre el incremento de temperatura y entalpía y la variación de radiación solar durante el tiempo de vuelo. Aquí hay que puntualizar que para valores elevados de variación de radiación sí se observan tendencias más claras, como por otro lado es lógico. El objetivo del parámetro de variación de temperatura superficial,  $\delta T$ , es precisamente eliminar estos casos. Respecto a la entalpía, también representada, se observa que las acusadas diferencias en las condiciones de humedad generan un claro comportamiento dependiente de la dirección, con lo que su tendencia debe ser estudiada con precaución.

La media del flujo advectivo de calor recogida en la Tabla 6 es, sorprendentemente, negativa. Queda fuera de toda duda que este resultado es incorrecto, pues implica que el aire transfiere calor a la ciudad de forma sistemática. Las Figuras 35 y 36 muestran además relaciones muy dependientes de la dirección entre el flujo advectivo de calor y el incremento de entalpía, cuando ésta debiera ser en teoría siempre fuerte y positiva. La explicación más sencilla a este comportamiento reside en la baja altura de las estaciones, que limita el techo de los parámetros de rugosidad y genera perfiles más abruptos. Con puntos de medición más elevados sería posible

hacer una mejor estimación de las rugosidades, lo que devendría en perfiles más realistas.

Finalmente, las Figuras 37-40 muestran la evolución temporal de los incrementos de temperatura, humedad relativa y entalpía. Aunque dotados de una notable dispersión, los resultados se ajustan a lo previsto para el caso San Pablo-Tablada al mostrar un pico de transferencia durante los periodos calurosos, pero las diferencia de humedad generan comportamientos inversos para la otra dirección en el caso de la entalpía. De nuevo, las condiciones locales impiden realizar un análisis adecuado.

## 5 CONCLUSIONES

El estudio realizado permite sacar una serie de conclusiones clave que deben ser tenidas en cuenta para futuros experimentos:

1. Las correlaciones entre la variación energética del aire y la radiación solar global han demostrado que el modelo es lo suficientemente sensible como para detectar el efecto térmico del terreno, validando con ello el proceso de filtrado de datos.
2. El set de estaciones meteorológicas empleadas para este tipo de análisis debe rodearse de entornos similares.
3. Para evitar el efecto de convección entre la tierra y el mar, la ciudad bajo estudio debe ser interior.
4. Para obtener una muestra estadística significativa, las estaciones deben estar lo más cerca posible.
5. Los puntos de medición deben estar situados a una altura suficiente para sortear la rugosidad del terreno y su característica heterogeneidad. Para ello, se recomienda instalar sensores a alturas de entre 20 y 200 metros sobre el techo de los edificios, zona propia de la Subcapa Superficial.

Aunque tomando los resultados del experimento sobre Sevilla con la prudencia debida, la Tabla 6 muestra valores promedio de incremento de temperatura de 0.1976 K a una altura de medición de 10 metros, siendo además este valor aproximadamente constante para ambas direcciones.

Los hallazgos de este experimento incitan a la búsqueda de un nuevo escenario que permita aplicar las anteriores recomendaciones. Al tratarse de la ciudad más poblada de España, situada justo en el centro del país y con masas de agua relativamente pequeñas, se opta por la ciudad de Madrid como paso lógico de la aplicación del modelo. Como se muestra en la Figura 43, esta ciudad tiene la ventaja añadida de disponer de tres estaciones meteorológicas relativamente cercanas, lo que amplía significativamente la muestra estadística. La baja altura de las estaciones puede seguir siendo una desventaja.

Se recomienda igualmente probar el modelo en distintos tipos de superficies, con especial atención en aquéllas que aporten puntos de referencia de comportamiento claros (terrenos agrícolas, forestales, desérticos...). Una importante aplicación en la monitorización de superficies puede extraerse de este estudio.

Habiendo agotado todas las posibilidades que una única altura de medición pudiese aportar, se sugiere como último paso lógico el empleo de torres meteorológicas de distribución logarítmica de instrumentos como la mostrada en la Figura 44. Con una red de torres similares (no necesariamente tan elevadas) en el entorno de una ciudad se podría hacer una estimación mucho más precisa de los perfiles verticales, con las repercusiones en el cálculo del flujo advectivo que ello tendría.

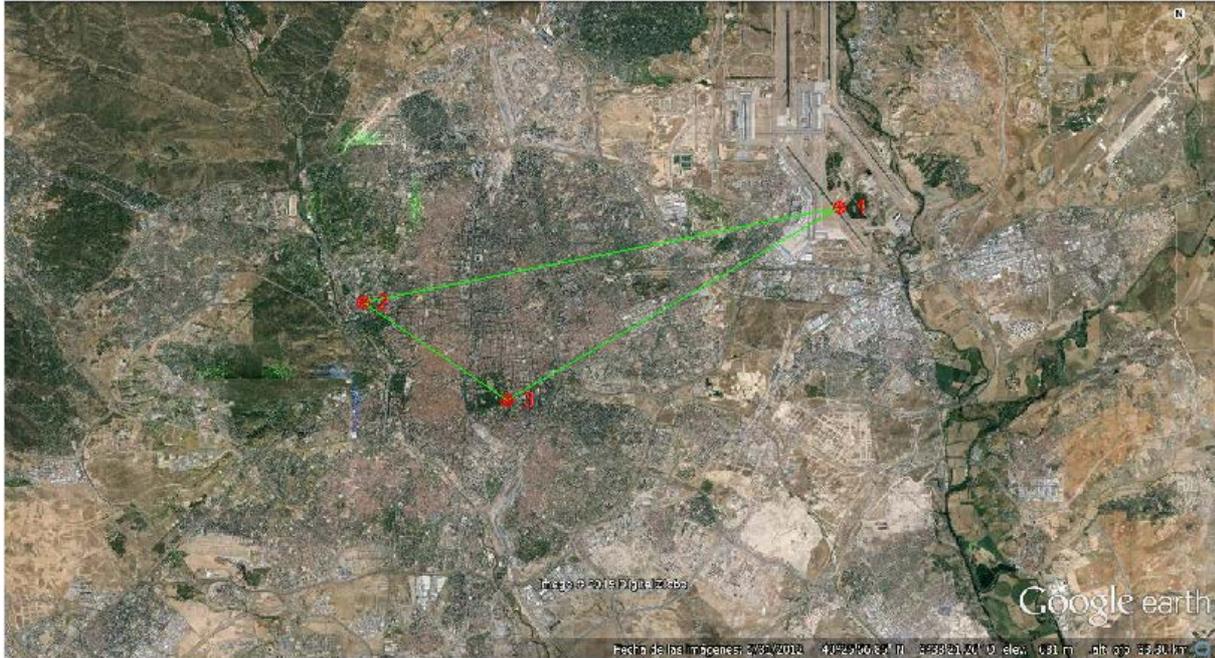


Figura 43: Estaciones meteorológicas automáticas de la AEMET en Madrid. Una cuarta estación se sitúa en las afueras

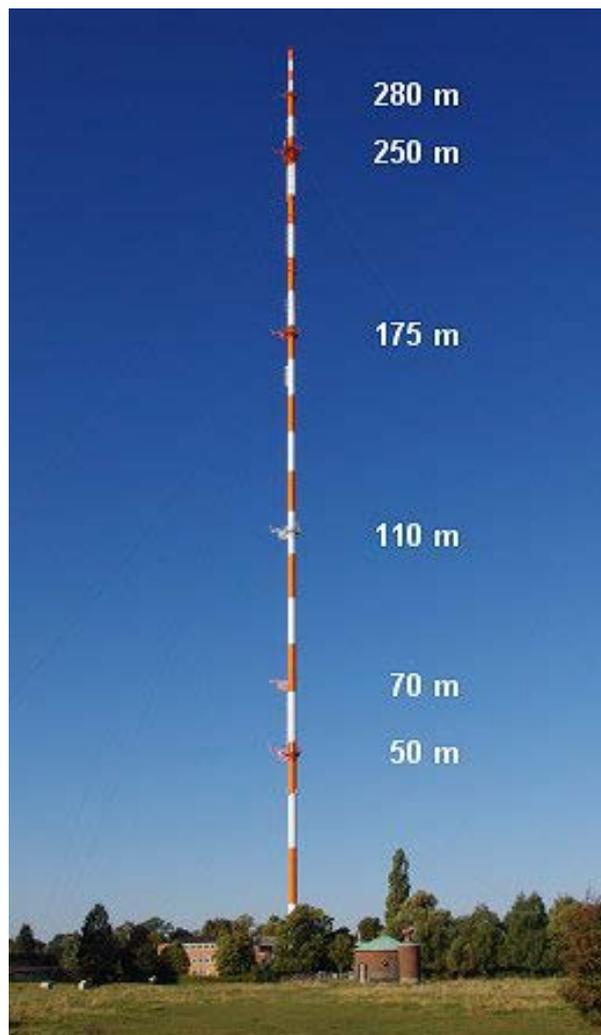


Figura 44: Torre meteorológica de la Universidad de Hamburgo

## REFERENCIAS

1. **Population Reference Bureau.** 2015 World Population Data Sheet. [Online] [http://www.prb.org/pdf15/2015-world-population-data-sheet\\_eng.pdf](http://www.prb.org/pdf15/2015-world-population-data-sheet_eng.pdf)
2. **Sailor, D.J.** *Urban heat islands, opportunities and challenges for mitigation and adaptation.* . s.l. : North American Urban Heat Island Summit. Toronto, Canada. Data courtesy Entergy Corporation, 2002.
3. **J. Díaz, C. Linares, R. García.** *Impacto de las temperaturas extremas en la salud pública: futuras actuaciones.* 2, Revista Española de Salud Pública, Vol. 79, págs. 145-157, 2005
4. **Kalkstein, L.S.** *Lessons from a very hot summer.* 346, The Lancet, págs. 857-859, 1995
5. **L.S. Kalkstein, J.S. Greene.** *An evaluation of climate/mortality relationships in large US cities and the possible impacts of a climate change.* Environmental Health Perspective, Vol. 105, págs. 84-93, 1997
6. **Environmental Protection Agency.** *Beating the heat: Mitigating thermal impacts.* Nonpoint Source News-Notes, Vol. 72, págs. 23-26, 2003
7. **Mills, G.** *Luke Howard and The Climate of London.* s.l. : Weather, Vol. 63, págs. 153-157 2008
8. **Howard, Luke.** International Association for Urban Climate. [En línea] [Citado el: 01 de 02 de 2016.] [http://www.urban-climate.org/documents/LukeHoward\\_Climate-of-London-V1.pdf](http://www.urban-climate.org/documents/LukeHoward_Climate-of-London-V1.pdf)
9. **Environmental Protection Agency (EEUU).** Reducing urban heat islands: Compendium of strategies. [En línea] [Citado el: 07 de 02 de 2016.] <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/basicscompendium.pdf>
10. **Oke, T.R.** *The Distinction between canopy and boundary-layer heat islands.* s.l. : Atmosphere, Vol. 14, págs. 268-277, 1976
11. **Oke, T.R.** *Methods in urban climatology.* 14, s.l. : Applied Climatology, Zürcher Geographische Schriften, págs. 19-29, 1984
12. **Harman, I.N.** *The Energy Balance of Urban Areas.* s.l. : PhD Thesis, 2003
13. **J.C. Kaimal, J.C. Wyngaard.** *Atmospheric boundary layer flows: Their structure and measurement.* s.l. : Oxford University Press, ISBN 0 19 506239 6, 1994
14. **Crasto, G.** *Review of urban climatology (PhD).* s.l. : Università degli Studi di Cagliari, Facoltà di Ingegneria, 2007
15. **Oke, T.R.** *The urban energy balance.* Progress in Physical Geography, Vol. 12, págs. 471-508, 1988
16. **M.R. Raupach, A.S. Thom, I. Edwards.** *A wind-tunnel study of turbulent flow close to regularly arrayed rough surfaces.* 18, Boundary-Layer Meteorology, págs. 373-397, 1980
17. **Rafailidis, S.** *Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town.* Boundary-Layer Meteorology, Vol. 85, págs. 255-271, 1997
18. **Oke, T.R.** *Boundary Layer Climates.* s.l. : Psychology Press, ISBN: 978-0415043199, 1987
19. **H. Cheng, I.P. Castro.** *Near wall flow over an urban-like roughness.* Boundary-Layer

Meteorology, Vol. 104, págs. 229-259, 2002

20. **Roth, M.** *Review of atmospheric turbulence over cities.* Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 126, págs. 941-990, 2000

21. **Arnfield, A.J.** *Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island.* International Journal of Climatology, Vol. 23, págs. 1-26, 2003

22. **Oke, T.R.** *Comparison of heat fluxes from summertime observations in the suburbs of four north american cities.* Journal of Applied Meteorology, Vol. 34, págs. 873-889, 1995

23. **Sobrino, J.A., y otros.** *Desirex 2008: Urban Heat Island analysis in the city of Madrid.* Spanish Journal of Remote Sensing, Vol. 31, págs. 80-92, 2009

24. **Bretherton, C.** *Lecture 6. Monin-Obukhov similarity theory*

25. **Stoll, M.J. y Brazel, A.J.** *Surface-air temperature relationships in the urban environment of Phoenix, Arizona.* 1992, Physical Geography, Vol. 13, págs. 160-179, 1992

26. **Instituto Nacional de Estadística.** *Cifras oficiales de población resultantes de la revisión del padrón municipal a 01/01/2015.* [En línea] [Citado el: 07 de 06 de 2016.] <http://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2911>

27. **Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, Fichas Municipales - Sevilla.** [En línea] [Citado el: 07 de 06 de 2016.] <http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/sima/htm/sm41091.htm>

28. **Raupach, M.R.** *Anomalies in flux-gradient relationships over forest.* s.l.: Boundary-Layer Meteorology, Vol. 16, págs. 467- 486, 1979

29. **Roth, M.** *Review of atmospheric turbulence over cities.* 2000, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 126, págs. 941-990, 2000.