



## **UNIVERSIDAD DE LEÓN**

### **Departamento de Ingeniería Mecánica, Informática y Aeroespacial**

**Mejoras en el estudio y predicción de los campos de viento locales, especialmente en entornos aeroportuarios, con importante afectación a la seguridad del tráfico aéreo**

---

**Improvements in the study and prediction of local wind fields, particularly in airport surroundings, with implication in air traffic safety**

**Diego Domínguez Fernández**

**León 2012**



**UNIVERSIDAD DE LEÓN**

**Departamento de Ingeniería Mecánica, Informática y  
Aeroespacial**

**Mejoras en el estudio y predicción de los campos de viento locales, especialmente en entornos aeroportuarios, con importante afectación a la seguridad del tráfico aéreo**

---

**Improvements in the study and prediction of local wind fields, particularly in airport surroundings, with implication in air traffic safety**

Tesis Doctoral realizada por D. Diego Domínguez Fernández para la colación del grado de doctor, bajo la dirección del Dr. D. Jesús Gonzalo de Grado.

V°B°

Fdo.: Dr. Jesús Gonzalo de Grado

A mi familia y amigos,  
a los que por derecho les  
corresponde el tiempo que les  
robé para dedicárselo a la tesis.

*Ad astra, per aspera*





## AGRADECIMIENTOS

Llegados a este punto es difícil alcanzar el equilibrio entre una falsa modestia y el más que merecido agradecimiento a todas las personas e instituciones que, en las más variadas formas, han contribuido a la realización de esta Tesis Doctoral. Aunque el esfuerzo personal es fundamental para alcanzar cualquier meta, no sería posible lograrlo sin la ayuda de todos aquellos que nos rodean.

Anteponiendo a los personas frente a las instituciones, en primer lugar he de agradecer a Jesús Gonzalo la confianza que siempre ha depositado en mí; creyendo desde el principio, y habitualmente más que yo mismo, en la llegada a buen puerto de esta aventura a ratos tortuosa. En segundo lugar, agradecer toda la ayuda, no solo en forma de trabajo, sino también de ánimos, que me habéis proporcionado todos los que habéis sido mis compañeros de laboratorio, especialmente Deibi López, compañero de fatigas y buenos momentos que me ha sufrido todos estos años. Y, como no podría ser de otra forma, gracias a vosotros, mi familia, y especialmente a ti Patricia, sois los que más directamente habéis sufrido los malos momentos y más habéis disfrutado los buenos, huelga decir que vuestro apoyo ha sido el más importante de todos.

En el ámbito profesional diversas son las instituciones cuya colaboración ha sido imprescindible para que esta Tesis haya podido realizarse en la forma que aquí se presenta. Quisiera agradecer a *Ingeniería y Servicios Aeroespaciales S.A. (INSA)* las iniciativas llevadas a cabo en esta universidad en las que me ha permitido participar, así como los permisos para la utilización de algunos equipos y datos para la realización de la tesis. Importante ha sido también la colaboración de la *Fundación Centro de Supercomputación de Castilla y León*, gracias al acceso brindado a sus instalaciones ha sido posible realizar en el tiempo y forma adecuado los cálculos necesarios; especialmente gracias a Jesús Lorenzana, cuyo esfuerzo y dedicación al trabajo son dignos de admiración. Finalmente, agradecer a la *University of Leeds* que se ofreciera a acogerme durante la estancia de investigación bajo la supervisión del Dr. Osvaldo M. Querin, fue una experiencia muy gratificante y enriquecedora.

A todos los que han participado de una forma u otra en este trabajo y, aunque con esto no se compensa, GRACIAS POR TODO.



## RESUMEN

El viento es un elemento esencial en la climatología. Las actividades humanas que se ven influenciadas por esta característica meteorológica son numerosas, pudiéndose citar entre las más importantes las operaciones aéreas, la producción de energía eléctrica, la construcción civil, la navegación marítima y la dispersión de contaminantes. Concretamente, en el ámbito de la aviación, conocer las condiciones del viento es un elemento esencial para la preparación de cualquier actividad aeronáutica, especialmente aquellas que tienen que ver con la seguridad de despegues y aterrizajes y la optimización de trayectorias.

La predicción y la medición de los campos de vientos son los dos aspectos clave en torno a los cuales pivota nuestro conocimiento de los mismos, y es por ello que la presente Tesis Doctoral trata de mejorar técnicas involucradas en ambas actividades y su uso combinado.

Hoy en día, la predicción de vientos se realiza fundamentalmente mediante técnicas de cálculo numérico, basadas en la resolución de ecuaciones de la mecánica de fluidos con la ayuda de potentes ordenadores. Uno de los aspectos críticos para maximizar la precisión de los resultados se encuentra en las condiciones de contorno de las ecuaciones, normalmente proporcionadas a partir de mediciones remotas o in-situ. Tradicionalmente, los modelos habituales para el estudio del viento han sido de dos tipos: de una parte los modelos meteorológicos de mesoescala y, de otra, los modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés). Ambos modelos ofrecen diferentes ventajas en sus prestaciones, los primeros especializados en dominios grandes y la composición atmosférica y los segundos en la precisión y la resolución de los resultados; habitualmente, las dos técnicas han seguido caminos de desarrollo separados que en pocas ocasiones se han cruzado. En el presente trabajo se ha llevado a cabo un importante esfuerzo por establecer los procedimientos y técnicas adecuados para conseguir un funcionamiento acoplado de los mismos. Para ello se ha buscado definir dominios y geometrías compatibles entre ambos tipos de predicción, modelos físicos que funcionen con variables compatibles y un reparto de esfuerzos de computación coherente. Uno de los principales problemas localizados ha sido conseguir un modelo numérico para el CFD capaz de representar convenientemente la capa límite atmosférica. Los códigos estándar incluidos en los programas de CFD no incluyen los últimos avances conseguidos en el ámbito de la simulación del viento, ofreciendo por tanto unos resultados insuficientes, tal como ha quedado patente con los ensayos realizados. Es por ello que se ha tenido que recurrir a la modificación del modelo numérico empleado por el código de simulación, aprovechando así las grandes posibilidades de manipulación que ofrecen los códigos abiertos utilizados. Con el modelo modificado se han realizado nuevos ensayos de validación, pasando posteriormente a la realización de las simulaciones globales para el entorno del Aeropuerto de León. Mediante estas simulaciones se pudo comprobar el correcto desempeño de importantes aspectos, como la influencia de la resolución de la

mallas, el correcto acoplamiento de las variables y la precisión del modelo en su conjunto. La complejidad y tamaño del modelo numérico hacen que se requiera de elevadas capacidades de cálculo, que también se dimensionan.

El segundo pilar fundamental de la Tesis lo constituye ese nuevo sistema de medida del viento pensado para ofrecer una alternativa de bajo coste y resolución media a las actuales técnicas de obtención de perfiles de velocidad del viento en altura. Este sistema se basa en el seguimiento mediante cámaras de burbujas más ligeras que el aire, las cuales, impulsadas únicamente por el viento y su flotabilidad, ascienden libremente por la atmósfera. De esta forma, gracias a la pequeña inercia de estos aglomerados, se puede inferir la velocidad del viento en las diferentes alturas mediante su seguimiento desde tierra; esta técnica mezcla ideas usadas en *particle image velocimetry* (PIV) para visualización de flujos en túneles de viento junto con otras del ámbito de la teledetección/fotogrametría. Se han efectuado numerosos ensayos de validación en el entorno del Aeropuerto de León. Allí se ha desplegado, junto al material necesario para elaborar los aglomerados de burbujas y las fotos de seguimiento, los equipos de tierra necesarios para obtener mediciones de alta precisión que sirvan como datos de validación y calibración. Los resultados de las pruebas han sido muy prometedores y muestran la capacidad del sistema para determinar la velocidad del viento y su dirección de una manera asequible e inocua para el tráfico aéreo.

# ABSTRACT

The wind is an essential element in climatology. A lot of human activities are influenced by this phenomenon; some of them are aircraft operations, electricity production at wind farms, civil engineering, sailing, pollutant dispersion or analysis of pedestrian wind comfort. Specifically, for the aviation, knowing the wind conditions is an essential piece of information in order to prepare any activity, especially those related to safety during landings and takeoffs or trajectory optimization.

Measurement and prediction are the two major ways that allow us to get a better understanding of wind fields; thus, this Thesis tries to improve the current knowledge about them.

Nowadays, wind prediction is performed by means of numerical techniques that are able to solve fluid dynamics equations by means of high performance computing. Boundary and initial conditions, usually provided by remote or in-situ sensors, are key elements to maximize solution accuracy. Traditionally, two models have been employed in order to study wind fields: on the one hand, mesoscale meteorological models and, on the other hand, computational fluid dynamics models. Both offer different advantages, mesoscale models are focused on really big domains and atmospheric processes while CFD models are addressed to high accuracy and resolution in the results. Commonly, they have followed separated development paths with little relationship between them. A great effort has been done towards the creation of adequate procedures and techniques capable to offer a high performance coupled model. Trying to reach this target, domain characteristics allowing geometrical adjustment have been defined, as well as compatible physical modeling for mesoscale and microscale model and some other necessary issues. An important difficulty that has been encountered during the work is getting on a CFD model being capable of modeling in an acceptable way the atmospheric boundary layer. This problem has been widely studied but, at the moment, commercial CFD codes do not include latest advances about the subject and their results are not reliable enough. This was confirmed by several simulations, where inlet profiles changed quite a lot passing through an empty flat domain. Because of this, a code modification for the turbulence model was applied thanks to the used open source code, which allow for modifications. The new model was tested showing an improvement in the achieved results, in which the difference between inlet and outlet profiles was minor. Once the new turbulence model was tested, the coupled model was employed in simulations involving all the Leon Airport surroundings, testing some important issues such as mesh refinement, variable coupling and the numerical model itself. The computational requirements of the coupled model are really high and must be carefully analyzed, thus the use of a high performance computing environment is highly recommended.

Regarding wind measurement, a new low cost system is proposed for this task as an alternative to present instruments that are able to get speed and direction profiles. It is

based on the remote tracking of lighter than air bubble clusters by means of photographic cameras, whereas these bubble clusters can move freely through the atmosphere, impulsed only by the wind and its own buoyancy. Due to this reason, and thanks to the very low inertia of the bubbles, it is possible to deduce wind speed just by knowing bubble cluster speeds when they are at certain height. This technique mixes ideas from particle image velocimetry (PIV), employed for flow visualization in wind tunnels, and remote sensing technologies. Quite a lot of validation trials have been conducted in the Leon Airport, where a development version of the system has been deployed for making the bubbles and taking the photos together with specific equipment capable of collecting high accuracy measurements. These measurements were used to validate results obtained by the new system. Validation shows that results obtained by the new developed system, wind speed and direction, match pretty well with those provided by the anemometer. This can be checked with the graphs and tables included in chapter 4, where all these data are available.

In order to check the accuracy of the numerical method, wind profiles provided by the coupled model were checked with those profiles obtained by the bubble tracking system and the mesoscale model alone.

# TABLA DE CONTENIDOS

Agradecimientos .....	iii
Resumen.....	i
Abstract.....	iii
Índice de figuras .....	ix
Índice de tablas.....	xiii
Glosario de símbolos .....	xv
1. Introducción.....	1
1.1. La necesidad de conocer el viento.....	1
1.2. Objetivos y metodología.....	3
2. State of the art in wind field measurement and forecasting.....	5
2.1. Wind field forecasting .....	6
2.1.1. Mesoscale meteorological models.....	7
2.1.1.1. Governing equations.....	11
2.1.1.2. Discretization.....	13
2.1.1.3. Atmospheric Boundary Layer modeling in the Weather Research and Forecasting.....	14
2.1.2. Computational Fluid Dynamics models.....	17
2.1.2.1. Conservation principles and numerical solution.....	18
2.1.2.2. The Atmospheric Boundary Layer: modeling a turbulent flow .....	18
2.2. Coupling mesoscale and CFD models.....	25
2.3. Wind field measurement and involved technologies .....	28
2.3.1. The log wind profile.....	28
2.3.2. Meteorological towers .....	29
2.3.3. Doppler RADAR.....	30
2.3.4. Light detection and ranging (LIDAR) .....	32
2.3.5. Sound Detection And Ranging (SODAR) .....	33
2.3.6. Observation balloons .....	35
2.3.7. Satellites.....	35
3. Integración de modelos numéricos de mesoescala y microescala .....	37

3.1.	El modelo numérico de mesoescala.....	38
3.1.1.	Definición de los dominios.....	39
3.1.2.	Asimilación de observaciones en el dominio .....	40
3.1.2.1.	Asimilación de datos en cuatro dimensiones .....	40
3.1.2.2.	Análisis variacional de datos.....	41
3.1.3.	Inicialización de las simulaciones.....	42
3.1.4.	Configuración del modelo físico y dinámico.....	43
3.1.5.	Validación del modelo numérico de mesoescala.....	46
3.2.	El modelo CFD de microescala.....	48
3.2.1.	Modelo numérico.....	49
3.2.2.	Modelo de turbulencia.....	52
3.2.3.	Condiciones de contorno para la verificación del modelo.....	52
3.2.4.	Validación del modelo para simulaciones de la capa límite atmosférica .....	54
3.2.4.1.	Configuración del caso de validación con modelo <i>k-epsilon</i> estándar ...	55
3.2.4.2.	Resultados del caso de validación modelo <i>k-epsilon</i> estándar .....	55
3.2.4.3.	Alternativas para el modelado de la capa límite terrestre.....	61
3.2.4.4.	Modelo adoptado para simulación de la capa límite terrestre e implementación en el código CFD .....	65
3.2.4.5.	Validación del modelo <i>k-epsilon</i> modificado.....	66
3.2.4.6.	Conclusiones del caso de validación del modelo CFD .....	69
3.3.	Procedimiento de asimilación.....	69
3.3.1.	Elaboración del dominio de simulación de microescala sobre terreno complejo	70
3.3.2.	Asimilación de las variables .....	73
3.3.2.1.	Asimilación de la velocidad.....	74
3.3.2.2.	Asimilación de las variables de la turbulencia:.....	74
3.3.3.	Condiciones de contorno en la simulación del modelo acoplado .....	76
4.	Wind field measurement method based on free bubble tracking.....	79
4.1.	Method Overview .....	79
4.2.	Model of the Motion .....	80
4.2.1.	The state vector and its observation.....	81
4.2.2.	Covariance matrices $P_0$ , $Q$ and $R$ .....	84
4.3.	Numerical Results .....	85



4.3.1.	Numerical testing of the wind speed profile measurement system .....	86
4.4.	Field Measurements .....	90
4.4.1.	Initial validation tests .....	90
4.4.2.	System tests in the airport .....	93
4.5.	Conclusion .....	124
5.	Aplicación del modelo de predicción integrado en entornos aeroportuarios .....	127
5.1.	Creación del dominio de microescala .....	127
5.2.	Análisis de sensibilidad para la discretización del dominio .....	129
5.3.	Análisis de resultados para diferentes condiciones de la atmósfera .....	136
6.	Conclusiones .....	151
6.1.	Líneas de trabajo futuro .....	154
7.	Conclusions.....	155
7.1.	Future research work.....	157
	Bibliografía .....	159
	Apéndice A. Algunos elementos del filtro de Kalman extendido .....	169
	Apéndice B. Consideraciones para el correcto uso de las funciones de pared en simulaciones CFD.....	171



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figure 1 Arrows represent wind speed and direction at different altitudes.....	6
Figure 2: WRF ARW modeling system flow chart .....	11
Figure 3: $\eta$ levels in ARW numerical mesoscale model .....	12
Figure 4: Horizontal and vertical grid schemes in the arw .....	14
Figure 5: Structure of the planetary boundary layer. Horizontal wind $v_h$ and stress $\tau$ within the boundary layer are also shown.....	15
Figure 6: Processes inside the Planetary Boundary Layer .....	17
Figure 7: Instantaneous velocity measured in one point in turbulent flows .....	19
Figure 8: Typical wind speed profiles under different atmospheric conditions .....	29
Figure 9: A 120 m meteorological tower.....	30
Figure 10: A doppler meteorological radar (left) and an example of the obtained measurements (right).....	31
Figure 11: Principle setup of a lidar system .....	33
Figure 12: Antenna sodar for wind and turbulence profile measurements up to about 1000 m above ground.....	34
Figure 13: Phased-array sodar for wind and turbulence profile measurements up to several hundreds of meters above ground .....	34
Figure 14: Diferentes modos de filtrado para la inicialización de las predicciones en el wrf .....	43
Figure 15: Error en presiones y temperaturas de los modelos wrf y hirlam respecto a las medidas tomadas por globo de sondeo .....	47
Figure 16: Error en velocidad de viento de los modelos WRF y HIRLAM respecto a las medidas tomadas por globo de sondeo .....	47
Figure 17: OpenFOAM general structure.....	48
Figure 18: Algoritmo de resolución SIMPLE .....	51
Figure 19: Dominio vacío discretizado para pruebas de validación .....	55
Figure 20: Resultados para la simulación con velocidad fija en la parte superior del dominio. a) perfiles de velocidad a la entrada y salida, b) diferencia en porcentaje entre ambos perfiles.....	56

Figure 21: Resultados para la simulación sin velocidad fija en la parte superior del dominio. a) perfiles de velocidad a la entrada y salida, b) diferencia en porcentaje entre ambos perfiles.....	56
Figure 22: Perfiles de la velocidad, turbulencia y disipación viscosa a la entrada y salida del dominio.....	57
Figure 23: entorno del Aeropuerto de León visto según un modelo digital de elevación....	70
Figure 24: Base de la Malla elaborada para el CFD siguiendo la orografía del terreno.....	71
Figure 25: Acoplamiento en alturas entre los terrenos de alta y baja resolución .....	72
Figure 26: Vista en planta del dominio de microescala ya finalizado.....	73
Figure 27: Wind Speed profile measurement system.....	80
Figure 28: Plan view of the system to determine elevation measurement .....	82
Figure 29: Elevation view of the system to determine azimuth measurement.....	82
Figure 30: Camera coordinate system for elevation .....	83
Figure 31: Camera coordinate system for azimuth .....	83
Figure 32: plan view of the path of tarjets in the three computer simulations .....	86
Figure 33: True speed and measured speed during simulation test 1 .....	87
Figure 34 True speed and measured speed during simulation test 2 .....	87
Figure 35 True speed and measured speed during simulation test 3 .....	87
Figure 36: Speed covariance (RMS values) obtained from speed elements in covariance matrix p.....	88
Figure 37: True speed and measured speed during test 4; 1/6 seconds time step .....	88
Figure 38: True speed and measured speed during test 5; 1/3 seconds time step .....	89
Figure 39: True speed and measured speed during test 4; 1 seconds time step .....	89
Figure 40: Speed covariance (RMS values) obtained from speed elements in covariance matrix p during the different time step tests .....	89
Figure 41: Wind speed measured at various levels.....	91
Figure 42: Croses, Profile of 10 minutes mean wind speed measured during the field tests. Solid line, extrapolated values of the ultrasonic anemometer measurement.....	91
Figure 43: Wind speed measured at various levels.....	92
Figure 44: Croses, Profile of 10 minutes mean wind speed measured during the field tests. Solid line, extrapolated values of the ultrasonic anemometer measurement.....	92
Figure 45: Speed Measurement profile obtained for each target launch .....	93
Figure 46 Wind profiler test location .....	93
Figure 47 Wind profiler test location .....	93

Figure 50: Canon Powershot SX110 IS Digital Camera used during the tests.....	94
Figure 48: Deployed equipment for the validation tests.....	94
Figure 49: Deployed equipment for the validation tests.....	94
Figure 51: Vaisala WINDCAP® Ultrasonic Wind Sensor WMT52 .....	95
Figure 52: An example of bubble clusters identified in a photograph.....	95
Figure 53: Wind direction measurements for convective mixed boundary layer .....	122
Figure 54: Wind direction measurements for a neutral boundary layer .....	122
Figure 55: Zona de estudio dominio de microescala .....	128
Figure 56: Superficie del dominio de microescala en el modelo acoplado.....	128
Figure 57: Ubicación de los puntos de muestreo en el entorno aeroportuario .....	130
Figure 58: Evolución de los residuales durante la simulación del modelo acoplado .....	133
Figure 59: Distribución de velocidades en las proximidades de una pared sólida. ....	172
Figure 60: Tamaños de celda para modelos de Reynolds alto y bajo.....	173
Figure 61: Variación de la ley logarítmica para diferentes valores de rugosidad.....	175



## ÍNDICE DE TABLAS

Table 1: Some Mesoscale Meteorological Models and their developers.....	7
Table 2: Errores de los parámetros simulados frente a las observaciones realizadas durante un periodo de 14 días .....	46
Table 3: Gráficas de error relativo con modelo k-épsilon estándar y rugosidad 0.03 m .....	60
Table 4: Gráficas de error relativo con modelo k-épsilon modificado y rugosidad 0.03 m .....	68
Table 5: Comparision between anemometer and bubble tracking results for wind speed .....	123
Table 6: Comparision between anemometer and bubble tracking results for wind direction .....	124
Table 7: Lista de mallas empleadas en el análisis de sensibilidad .....	129





## GLOSARIO DE SÍMBOLOS

ABL	Atmosferic Boundary Layer
ARW	Advanced Research Weather
$\beta_i$	Ángulo horizontal entre el clúster de burbujas y la cámara
CFD	Computational Fluid Dynamics
CWE	Computational Wind Engineering
$\delta_i$	Ángulo vertical entre el clúster de burbujas y la cámara
DFI	Digital Filter Initialization
$\varepsilon$	Disipación viscosa
$\xi$	Estabilidad de la columna de aire
EKF	Extended Kalman Filter
ESA	European Space Agency
FDDA	Four-Dimensional Data Assimilation
INSA	Ingeniería y Servicios Aeroespaciales S. A.
$G$	Coefficiente del nudging
$h$	Altura respecto al suelo
$k$ / TKE	Turbulent kinetic energy
$k_s$	Rugosidad de grano de arena
$k_s^+$	Rugosidad de grano de arena adimensional
$\eta$	Coordenada vertical de presión hidrostática
$\kappa$	Constante de Von Karman
LES	Large Eddy Simulation
LIDAR	Light Detection and Ranging
$\mu_t$	Viscosidad dinámica turbulenta
MMM	Mesoscale Meteorological Models
MSE	Mean Square Error
$\nu_t$	Viscosidad cinemática turbulenta
$p$	Presión
$P_0$	Matriz de covarianza del error
PBL	Planetary Boundary Layer
PIV	Particle Image Velocimetry

$Q_0$	Matriz de ruido del proceso
$q_r$	Flujo de radiación térmica
$\rho$	Densidad
$R$	Matriz de covarianza del error de las mediciones
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
Re	Reynolds
RMS	Root Mean Square
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
SODAR	Sonic Detection and Ranging
$T$	Temperatura
$U$	Velocidad del viento
$u$	Componente de velocidad en el eje x
$u_*$	Velocidad de fricción
$u^+$	Velocidad adimensional
$\Phi$	Matriz de transición de estado
$v$	Componente de velocidad en el eje y
$w$	Componente de velocidad en el eje z
WPS	Weather Research and Forecasting Preprocessing System
WRF	Weather Research and Forecasting
$x$	Vector de estado
$y^+$	Distancia a la pared adimensional
$y_p$	Distancia entre la pared y el centro de la celda adyacente
$z$	Vector de mediciones obtenidas
$z_0$	Rugosidad aerodinámica de la superficie
$z_m$	Vector de mediciones esperadas

# 1. INTRODUCCIÓN

---

El viento es un elemento esencial en la meteorología. Se define como masas de aire en movimiento y se origina por las diferencias de presión atmosférica, causadas a su vez por cambios de temperatura, que se producen entre distintas regiones de la atmósfera (Ahrens 2008). Ahora bien, además de las diferencias de presión, el modo en que se produce el movimiento de estas masas de aire viene condicionado por otros importantes factores como la fuerza de Coriolis o la orografía del terreno.

El viento se caracteriza esencialmente por su velocidad y dirección, aunque una definición más completa debería describir también aspectos tan importantes como las ráfagas que produce o su nivel de turbulencia. Ambos resultan críticos en numerosas aplicaciones y además determinan la forma en la que se producen importantes fenómenos en la atmósfera, especialmente aquellas relaciones con el transporte y la mezcla de especies en la capa límite planetaria.

## 1.1. LA NECESIDAD DE CONOCER EL VIENTO

Son numerosas las actividades humanas que se ven influenciadas por el viento, tantas que una enumeración exhaustiva es dificultosa; entre las más importantes podemos citar: operaciones aéreas (Manasseh and Middleton 1999), producción de energía eléctrica

(Landberg 1999), construcción civil (Van Nunen and Persoon 1982), dispersión de contaminantes (Gorlé, et al. 2009), confort de peatones (Sanz-Andres and Cuerva 2006), etc.

Específicamente, en lo que se refiere a la aviación, una parte esencial de la preparación de cualquier actividad aeronáutica es el conocimiento de las condiciones meteorológicas que se van a producir durante el desarrollo de la misma. Esto es así porque dichas condiciones tienen un impacto fundamental sobre la seguridad y eficiencia de las operaciones aéreas, hasta el punto de que una cuarta parte de todos los accidentes aéreos y una tercera parte de los accidentes fatales están relacionados con las condiciones meteorológicas (National Aviation Weather Services Committee, National Research Council 1995). De entre todas las variables meteorológicas, el viento es sin duda una de las que más afectan a las operaciones aéreas, el conocimiento de los campos de viento permite no sólo evitar situaciones de peligro para los ocupantes de las aeronaves, sino también un gran ahorro de combustible. De manera generalizada, la programación de las rutas se realiza con días de antelación, basándose en estadísticas de vientos tomadas de observaciones pasadas. Sin embargo, la utilización de técnicas computacionales tanto para la planificación como para la programación de los pilotos automáticos, permiten afinar las trayectorias en los instantes previos al vuelo, o incluso actualizarlas durante el propio vuelo de la aeronave, para así optimizar en gran manera los tiempos y consumos durante el trayecto.

Otro campo de gran interés para el estudio del viento es la generación de energía eléctrica en parques eólicos, en este caso la realización de estudios es necesaria en dos vertientes: por una parte son necesarios estudios exhaustivos que permitan determinar en qué puntos geográficos de una región se producen las mayores velocidades locales del viento, con el fin de instalar los molinos en dichos puntos, y el efecto que produce unos molinos sobre otros, de tal forma que puedan minimizarse las pérdidas. De otra parte, en parques eólicos ya instalados, resulta fundamental predecir con la mayor precisión y antelación posible la cantidad de energía eléctrica que va a poder volcarse en la red de distribución. En ambos casos se puede comprender fácilmente la importancia de conseguir mediciones y previsiones de viento de una gran precisión si se considera el hecho de que la energía eléctrica que es posible producir varía con el cubo de la velocidad del viento; por ello, un error del 3% en el momento de fijar la velocidad del viento puede traducirse en errores de más del 9% en la cantidad de energía disponible (Wolar 2008).

También cabe citar la importancia que tiene el conocimiento de las condiciones de viento en aspectos relacionados con la seguridad y la gestión de emergencias. De esta forma son numerosos los trabajos relacionados con el estudio de dispersión de contaminantes nocivos en los más diversos ambientes, siendo el viento el factor determinante en la forma en la que dicha dispersión y transporte tiene lugar. Un caso similar lo constituyen las predicciones que se elaboran para determinar la forma en que se produce la propagación de incendios, en los cuales el viento existente en el momento de producirse el fuego es determinante; en este caso, además, la dificultad de predecir el campo de vientos local es especialmente grande, ya que en incendios de gran tamaño, el propio fuego es capaz de modificar el viento existente en la zona.

Como puede comprobarse, el factor común en el estudio de tan variados problemas es la medición y predicción de los campos de viento locales, aspectos ambos en los que se tratará de mejorar la técnica y conocimiento existente al respecto, lo que viene a conocerse como *estado del arte*, a lo largo del presente trabajo.

## 1.2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

Según se ha explicado, medición y predicción de los campos de vientos son los dos aspectos clave entorno a los cuales pivota nuestro conocimiento de los mismos y es por ello que mejorar las técnicas y metodologías empleadas en ambos aspectos constituyen los grandes objetivos macro de la presente tesis.

Uno de los objetivos es el relativo a la mejora en las técnicas de predicción de los campos de viento. Las herramientas habituales para la predicción de campos de viento son los métodos de simulación numérica. Existen dos grandes grupos de modelos numéricos que tradicionalmente se han desarrollado y empleado por separado, los modelos meteorológicos y los modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés). En el presente trabajo se tratará de desarrollar una metodología clara y eficiente que permite acoplar ambos modelos numéricos de tal manera que puedan emplearse como una única y potente herramienta de predicción numérica del viento. Para ello se analizarán las técnicas de modelado que pueden permitir la compatibilidad entre ambos: modelos físicos, configuración de los dominios, acoplamiento de variables, etc. Es previsible que en el proceso se requieran modificaciones y herramientas informáticas realizada *ad hoc* para permitir la interconexión de ambas plataformas, ya que estas no han sido desarrolladas con tales funcionalidades. Se llevará a cabo un proceso de validación de los códigos CFD que permitirá determinar su capacidad para modelar correctamente la capa límite atmosférica. El proceso de validación se realizará inicialmente sobre un dominio computacional vacío en el que se emplearan expresiones teóricas para fijar el valor de entrada al dominio de las variables simuladas. A continuación se comprobará que las capacidades mostradas se mantienen en el caso de emplear como valor de entrada de las variables los proporcionados por el modelo meteorológico de mesoescala. Una vez se hayan confirmado las adecuadas capacidades del modelo CFD se llevarán a cabo simulaciones del modelo acoplado completo que permitirán poner a prueba su capacidad.

La propuesta de mejora de los sistemas de medición se basa en el diseño de un sistema de obtención de los perfiles verticales de la velocidad del viento basado en el seguimiento de conglomerados de burbujas más ligeros que el aire. En este sentido, el trabajo a realizar incluye el diseño de la arquitectura del sistema de medida y de sus principios de funcionamiento, que permiten convertir las mediciones angulares de las posiciones de las burbujas, realizadas mediante cámaras fotográficas convencionales, en valores de velocidad y posición. Una primera evaluación de las capacidades del sistema se realizará mediante simulaciones informáticas, que permiten confirmar la validez de sus principios de funcionamiento. Posteriormente se desarrollará un prototipo del sistema, capaz de ser

desplegado para la realización de pruebas de campo fuera del laboratorio. Dichos ensayos permitirán comprobar la validez del sistema mediante la comparación de los perfiles obtenidos con las medidas proporcionadas por los sensores de viento disponibles en ese momento. Mediciones realizadas con este método permitirán llevar a cabo la validación del modelo numérico.

## 2. STATE OF THE ART IN WIND FIELD MEASUREMENT AND FORECASTING

---

Since weather forecasting is not an exact science, the wind field predictions will occasionally be incorrect; unfortunately, accurate answers are beyond meteorology's present technical capabilities (Ahrens 2008). But, how are these predictions made? Two steps are needed: first, present wind conditions (as well as much more weather information) must be known; then, this information is analyzed and propagated to guess how weather conditions are going to change during the next hours, days or weeks.

So, it is obvious that there are two critical issues to improve our knowledge about the wind conditions: obtaining great quality measurements and employing them inside an accurate computational model.

But measuring or predicting wind speed and direction, especially at low height and near ground, it is not an easy task. When the air moves near the surface, a boundary layer is generated, being as high as 1000 m and defining the transition region between the geostrophic wind and the earth surface, where the wind speed must be close to zero. In the boundary layer, the wind speed rises with the height, changing also its direction (mainly due to Coriolis forces) (Emeis, Münkel, et al. 2004).

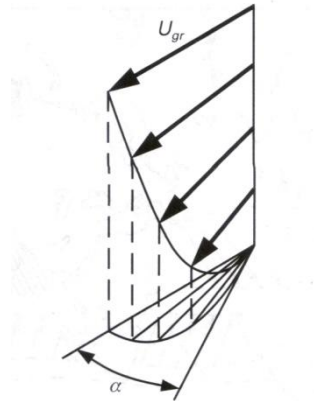


FIGURE 1 ARROWS REPRESENT WIND SPEED AND DIRECTION AT DIFERENT ALTITUDES (MESEGUER RUIZ, ET AL. 2001)

Wind, or air flow, can be divided into three broad categories: mean wind, turbulence and waves. Each can exist separately, or in the presence of any of the others. Transport of quantities such as moisture, heat or pollutants is dominated in the horizontal by the mean wind and, in the vertical, by turbulence. The reason is that vertical mean winds are very small, usually on the order of millimeters to centimeters per second (Stull 2009). A common approach for studying turbulence is to split wind speed into a mean part and a perturbation part. The mean part represents the effect of the mean wind, while the perturbation part can represent either the wave effect or the turbulence effect that is superimposed on the mean wind. It will be seen in later chapters how this splitting technique can be applied to the equations of motion, creating a number of new terms. Some of these terms, consisting of products of perturbation variables, can be neglected when mean speed is of primary interest but, on the other hand, their effect can be considered by means of some statistical variables like the Turbulent Kinetic Energy (TKE or just  $k$ ).

## 2.1. WIND FIELD FORECASTING

Wind forecasting basically entails predicting how the present state of the atmosphere will change, consequently present conditions must be known by means of any of the previously explained techniques. As late as the mid 1950s, all weather maps (and consequently wind maps) were plotted by hand and analyzed by individuals, in such conditions, experience played a major role in making the forecast. With the advent of modern computers, the routine daily forecasting of weather is made by means of computers using numerical weather prediction programs, also known as Mesoscale Meteorological Models (Ahrens 2008).



2.1.1. MESOSCALE METEOROLOGICAL MODELS

Mesoscale Meteorological Models (MMM) are numerical models which are able to model and forecast meteorological phenomenon like rain, snow, wind, temperature and others. Mesoscale in atmospheric science is defined as the horizontal extent between the synoptic/global and micro-scales. The synoptic/global scale is for a horizontal extent bigger than 2000 km all the way to the entire globe and, on the other hand, the micro-scale is for the horizontal extent of smaller than 2 km. These imply that in the mesoscale model horizontal scale is on the order of a few kilometers to several hundred kilometers or so and simulated time scales of a few hours to 24 hours (Pielke 2002).

Several MMM have been developed (Table 1):

TABLE 1: SOME MESOSCALE METEOROLOGICAL MODELS AND THEIR DEVELOPERS. ADAPTED FROM (YAMADA AND KOIKE 2011)

Models	Developers
A2C	YSA Corporation
COAMPS	Naval Research Laboratory
Eta	NOAA/NCEP
FITNAH	University of Hanover, Germany
MEMO (MIMO)	Aristotle University, Greece
METRAS (MITRAS)	University of Hamburg, Germany
WRF/MM5	NCAR/Penn. State University
NHM	Meteorological Research Institute, Japan
OMEGA	Science Applications International Corp
RAMS	Center for Environmental Studies of the Mediterranean
HIRLAM	Some european meteorological institutes

A brief description is going to be included:

- A2C: Is a meso to microscale forecasting system for airflows and dispersion of pollutants.
- COAMPS: The Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS) is a model developed at the Naval Research Laboratory (NRL) Marine Meteorology Division (MMD). The atmospheric component of COAMPS can be used for real-data or for idealized applications. It employs data from previous forecast as the first-guess and observations from aircraft, rawinsondes, ships, and satellites are blended with the first-guess fields to generate the current analysis. The atmospheric model uses nested grids to achieve high resolution for a given area; it contains parameterizations for subgrid scale mixing, cumulus parameterization, radiation, and explicit moist physics. Some mesoscale phenomena that have been tested with COAMPS include mountain waves, land-sea breezes, terrain-induced circulations, tropical cyclones, mesoscale convective systems, coastal

rainbands, and frontal systems. The domain usually covers a certain area, where the grid resolution may range from a few hundred kilometers (synoptic scale) to approximately 100 meters. The resolution of the grid depends on the scale of phenomena that should be simulated and the domain can be rotated to align with any surface feature, such as the terrain or a coastline, also the model can be run with any number of nested grids. The COAMPS atmospheric system consists of two major components: analysis and forecast. The analysis is run first to prepare the initial and boundary files used in the forecast model and then the forecast performs time integration of the model numerics and physics. The outputs prognostic and diagnostic fields can be provided in pressure, sigma, or height coordinates (Naval Research Laboratory 2003).

- **Eta:** The Eta Model is an atmospheric model used for research and operational purposes. The model is a descendent of the earlier HIBU (Hydrometeorological Institute and Belgrade University) model, developed in the seventies in the former Yugoslavia. It has been widely used in numerous countries. It employs the eta vertical coordinate, includes an option to run the model in a nonhydrostatic mode. While the primary use of the model has been for regional weather prediction and NWP type applications (for a review, see (Mesinger 2000)), the model has been very successful also in regional climate and seasonal prediction applications (Chou, Bustamante y Gomes 2005).
- **FITNAH:** Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat-Sources. It was developed in the 1980's and since then permanently enhanced to calculate 3D meteorological fields in complex terrain, especially thermally and dynamically induced flow systems.
- **MEMO:** Mesoscale Model. It is a three-dimensional, nonhydrostatic and prognostic mesoscale model that has been mainly employed in simulation of mesoscale air motion and inert pollutant dispersion at the local-to-regional scale including cases over complex terrain. The model describes the dynamics of the atmospheric boundary layer and solves the continuity equation, the momentum equations and several transport equations for scalars. It has been widely improved since its first release and it is still under development (Tsegas, et al. 2009). During the last years, a microscale version called MIMO (it employs CFD techniques) has been developed and integrated in the MEMO.
- **METRAS:** The three-dimensional nonhydrostatic MEsoscale TRAnsport and Stream is a 3d nonhydrostatic Eulerian mesoscale transport, chemistry and fluid model. It was developed in order to model atmospheric flows in regional scale, wind, temperature and humidity fields over complex terrain as well as transport of air pollutants. Wind field, temperature, humidity, cloud and rain water content as well as tracer concentrations are calculated from prognostic equations, pressure and density are calculated from diagnostic ones. In vertical direction a terrain following eta-coordinate is applied, in horizontal directions cartesian coordinates are used. It also includes chemical reactions that are solved with the chemistry model MECTM. The model is adjusted for regions between some kilometers (resolution of a few 10 meter) and up to 2000 km, although it may be nested in larger scale models. The model was validated in (Thunis, et al. 2003).

- WRF/MM5: The Weather Research and Forecasting model was created through a partnership that includes the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), the National Center for Atmospheric Research (NCAR), and a lot of organizations and universities. It has been the latest numerical program model to be adopted by NOAA's National Weather Service as well as the U.S. military and private meteorological services. It has been widely tested and nowadays is one of the most popular mesoscale models all around the world, as it has been adopted by the national weather agencies of Taiwan, South Korea, China, and India (University Corporation for Atmospheric Research 2006). This was the selected model for the present work and then a detailed description will be provided later.
- NHM: The NonHydrostatic Model was initially developed in Japan in the 1980's. It includes fully compressible equations with conformal map factors and it can model a lot of physical process like cloud microphysics, cumulus parameterization, Surface and boundary layer processes and Diagnosis of turbulent energy.
- OMEGA: The Operational Multiscale Environment Model with Grid Adaptivity is a multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation system with an unstructured dynamically adaptive grid that permits spatial resolutions ranging from 100 down to 1 km. OMEGA was developed taking into account two important features: the application of an unstructured dynamically adaptive mesh numerical technique to atmospheric simulation and the use of embedded atmospheric dispersion algorithms. Also, it is highly automated for configuration, data ingest, data quality control, data assimilation, grid generation, model operation, and postprocessing. It is able to link to baseline datasets and real-time meteorological data feeds (Boybeyi, et al. 2001).
- RAMS: The Regional Atmospheric Modeling System, is a three-dimensional, non-hydrostatic, mesoscale model. It is a highly versatile numerical code which can be used for simulating and forecasting meteorological phenomena. RAMS is primarily a limited area model, and many of its parameterizations have been designed for mesoscale or higher resolution scale grids. There is no lower limit to the domain size or to the mesh cell size of the model's finite difference grid; microscale phenomena such as tornadoes and boundary layer eddies, as well as sub-microscale turbulent flow over buildings and in a wind tunnel, have been simulated with this code. Two-way interactive grid nesting in RAMS allows local fine mesh grids to resolve small scale atmospheric systems such as thunderstorms, while simultaneously modeling the large-scale environment of the systems on a coarser grid. Its main application fields are: air quality modeling, heavy rain and flash-floods modeling, wildfires meteorology and extreme temperature (heat/cold) events (European Topic Centre on Air and Climate Change 2010).
- HIRLAM: The international research program HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) is a research cooperation of European meteorological institutes, they have created the HIRLAM model, a hydrostatic grid-point model, of which the dynamical core is based on a semi-implicit semi-Lagrangian discretisation of the multi-level primitive equations, using a hybrid coordinate in the vertical. Optionally, an Eulerian dynamics scheme can be used as well. The forecast model is a limited area model with a boundary relaxation scheme. There is also a non-

hydrostatic dynamical kernel of the grid-point model. Currently an operationally suitable mesoscale model is under development, the target horizontal resolution is 2.5 km and it is called HARMONIE.

Most of these models have really impressive capabilities and the selected one to be employed in this work was the Weather and Research Forecasting (WRF) model with the Advanced Research WRF (ARW) solver. It was designed to be a flexible, state-of-the-art atmospheric simulation system that is portable and efficient on parallel computing platforms. Also, it can be used in a broad range of applications across scales ranging from meters to thousands of kilometers. WRF software includes (National Center for Atmospheric Research 2008):

- WPS: The WRF Preprocessing System, its functions include: 1.- defining simulation domains, 2.- interpolating terrestrial data (like terrain, land use, soil types...) to the simulation domain, and 3.- degribbing and interpolating meteorological data from another model to this simulation domain
- WRF-Var: This program is used to ingest observations into the interpolated analyses created by WPS. Also, it can be used to update WRF model's initial condition when it is run in cycling mode.
- ARW Solver: This is the fundamental component of the modeling system, which is composed of several initialization programs for real-data simulations and the numerical integration program. Key features of ARW solver includes:
  - Fully compressible nonhydrostatic equations with hydrostatic option
  - Complete coriolis and curvature terms
  - Two-way nesting with multiple nests and nest levels
  - One-way nesting
  - Moving nests
  - Mass-based terrain following coordinate
  - Vertical grid-spacing can vary with height
  - Map-scale factors for conformal projections:
    - Polar stereographic
    - Lambert-conformal
    - Mercator
  - Arakawa C-grid staggering
  - Runge-Kutta 2nd and 3rd order timestep options
  - Scalar-conserving flux form for prognostic variables
  - 2nd to 6th order advection options (horizontal and vertical)
  - Positive-definite advection option for moisture, scalar and TKE
  - Time-split small step for acoustic and gravity-wave modes:
  - Small step horizontally explicit, vertically implicit
  - Divergence damping option and vertical time off-centering
  - External-mode filtering option
  - Lateral boundary conditions
  - Idealized cases: periodic, symmetric, and open radiative
  - Real cases: specified with relaxation zone

- Full physics options for land-surface, ABL, radiation, microphysics and cumulus parameterization

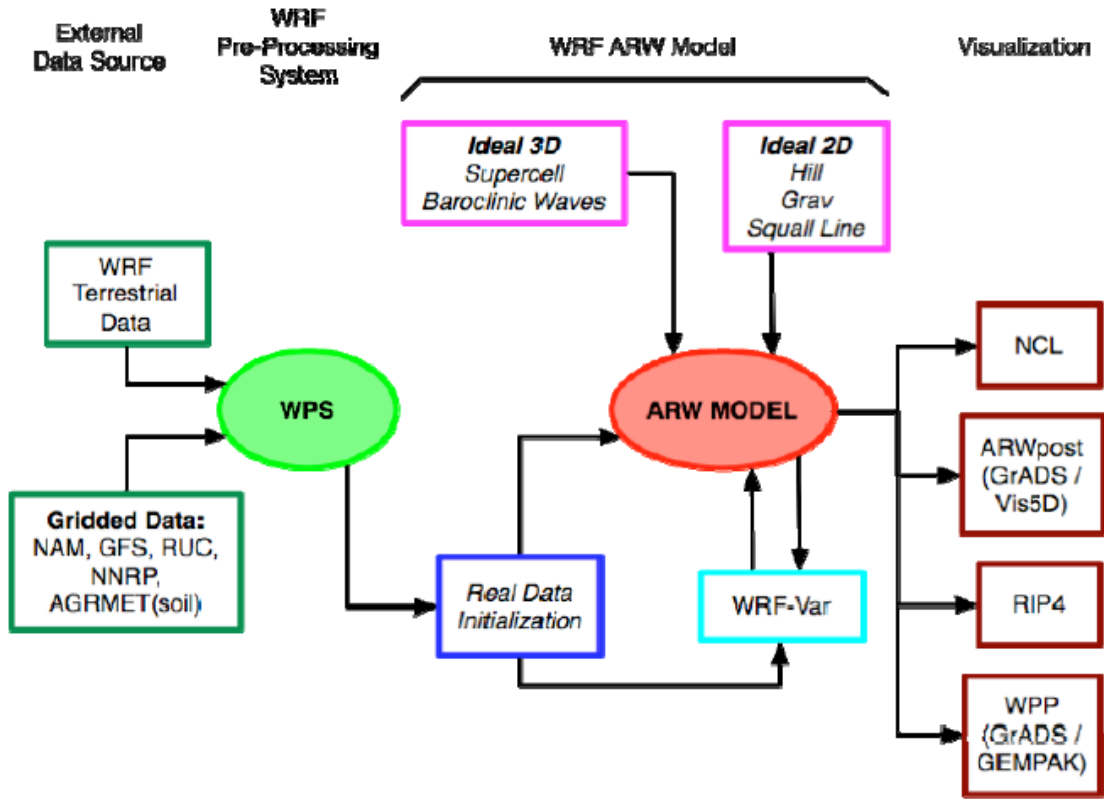


FIGURE 2: WRF ARW MODELING SYSTEM FLOW CHART

Although a detailed description of the ARW is not going to be included, a brief description of the governing equations and the discretization methods could be interesting.

### 2.1.1.1. Governing equations

Equations in the ARW model are formulated using a terrain-following hydrostatic-pressure vertical coordinate denoted by  $\eta$  and defined as

$$\eta = (p_h - p_{ht})/\mu \quad (1)$$

Where  $\mu = p_{hs} - p_{ht}$  and  $p_h$  is the hydrostatic component of the pressure at certain height,  $p_{hs}$  at the surface and  $p_{ht}$  at the top of the domain. This coordinate system can be easily understood thanks to Figure 3.

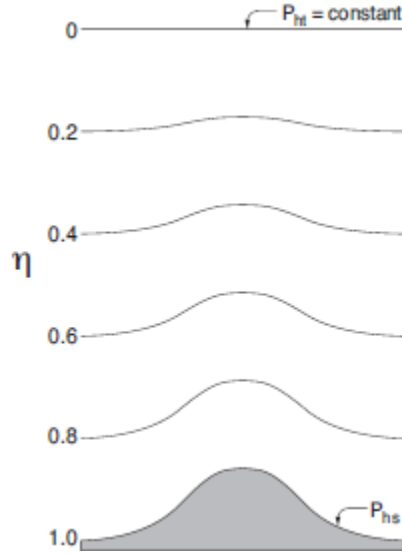


FIGURE 3:  $\eta$  LEVELS IN ARW NUMERICAL MESOSCALE MODEL (SKAMAROCK, ET AL. 2008)

This coordinate system was proposed in (Laprise 1992) and it is the traditional coordinate system employed in many hydrostatic atmospheric models. The  $\eta$  levels vary from 1 at the surface to 0 at the upper boundary of the model domain.

$\mu$  represents the mass per unit area within the column at  $(x, y)$ , then, the appropriate flux form variables are (Skamarock, et al. 2008):

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= \mu \mathbf{v} = (U, V, W) \\ \Omega &= \mu \dot{\eta} \\ \Theta &= \mu \theta \end{aligned} \quad (2)$$

$\mathbf{v} = (U, V, W)$  are the horizontal and vertical covariant velocities,  $\omega = \dot{\eta}$  is the contravariant 'vertical' velocity and  $\Theta$  is the potential temperature. Also, there are some other variables which appear in the equations:  $\phi = gz$  (geopotential),  $p$  (pressure), and  $\alpha = 1/\rho$  (the inverse density). With all of this, the flux-form Euler equations can be written as:

$$\begin{aligned} \partial_t U + (\nabla \cdot \mathbf{V}u) - \partial_x(p\partial_\eta\phi) + \partial_\eta(p\partial_x\phi) &= F_U \\ \partial_t V + (\nabla \cdot \mathbf{V}v) - \partial_y(p\partial_\eta\phi) + \partial_\eta(p\partial_y\phi) &= F_V \\ \partial_t W + (\nabla \cdot \mathbf{V}w) - g(\partial_\eta p - \mu) &= F_W \\ \partial_t \Theta + (\nabla \cdot \mathbf{V}\Theta) &= F_\Theta \\ \partial_t \mu + (\nabla \cdot \mathbf{V}) &= 0 \\ \partial_t \mu + (\nabla \cdot \mathbf{V}) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

With the inverse density relation:

$$\partial_\eta \phi = -\alpha \mu \quad (4)$$

And the equation of state:

$$p = p_0(R_d\theta/p_0\alpha)^\gamma \quad (5)$$

Where  $\gamma$  is the heat capacity ratio,  $R_d$  is the gas constant for dry air,  $p_0$  is the reference pressure and the terms  $F_\Theta, F_U, F_V, F_W$  represent forces arising from model physics, turbulent mixing, spherical projections, and the earth's rotation.

### 2.1.1.2. Discretization

Temporal and spatial discretization should be distinguished, as they refer to different concepts:

- **Temporal Discretization:** The ARW solver uses a third-order Runge-Kutta time integration scheme for low-frequency modes and the high-frequency modes are integrated over smaller time steps. The time-split integration for the flux-form equations is described and analyzed in (Klemp, Skamarock and Dudhia 2007). The ARW implementation uses the mass vertical coordinate and a flux-form set of equations, along with the use of perturbation variables for the acoustic component of the time-split integration.
- **Spatial Discretization:** The spatial discretization for the variables in the ARW solver uses a central grid staggering, as shown in Figure 4. The variable indices (i, j, k) indicate variable locations with  $(x, y, \eta) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta\eta)$ ,  $\theta$  denotes mass points location. Although they are not shown in Figure 4, the column mass  $\mu$  is defined at the (i, j) points on the discrete grid, the geopotential  $\phi$  and the moisture variables  $q_m$  are defined at the mass points. The pressure  $p$  and inverse density  $\alpha$  are computed at mass points. The grid lengths  $\Delta x$  and  $\Delta y$  are constants in the model formulation, however changes in the physical grid lengths due to spherical projections are accounted for using the map factors. The vertical grid length  $\Delta\eta$  is not a fixed constant; it is specified in the initialization. The only constraint is that  $\eta = 1$  at the surface,  $\eta = 0$  at the model top, and  $\eta$  decreases monotonically between the surface and model top.

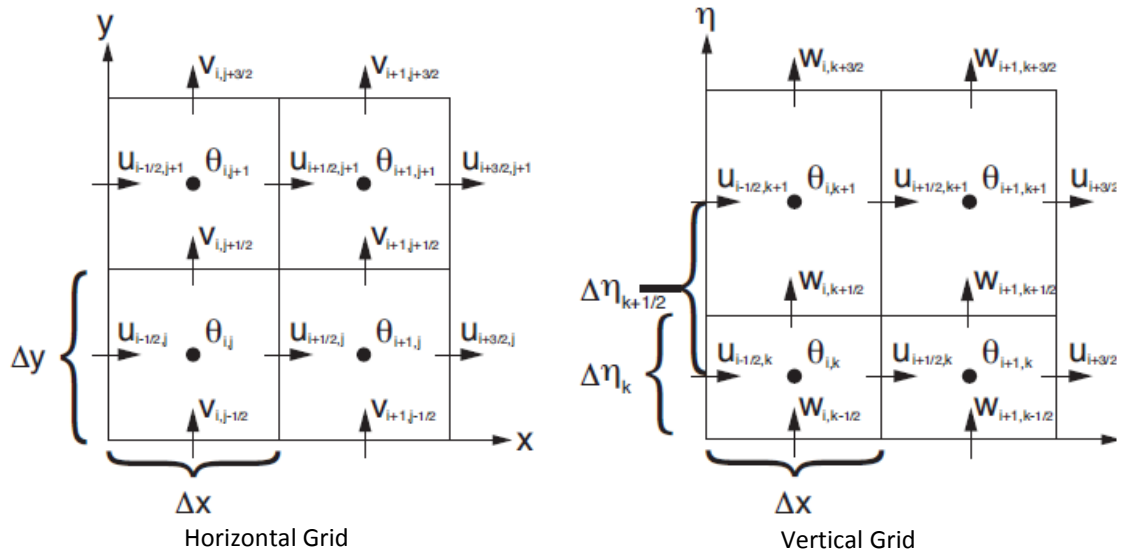


FIGURE 4: HORIZONTAL AND VERTICAL GRID SCHEMES IN THE ARW (SKAMAROCK, ET AL. 2008)

A much more detailed description about ARW discretization can be found in (Skamarock, et al. 2008), as well as a lot of information about the ARW solver.

### 2.1.1.3. Atmospheric Boundary Layer modeling in the Weather Research and Forecasting

The vertical structure of the atmospheric boundary layer is depicted in Figure 5. The lowest layer is the laminar sublayer, it is only few millimeters high and physical processes are regulated by molecular motion. Then, there is some kind of transitional region between the laminar sublayer and the Prandtl layer, where turbulence is fully developed. The lower boundary of the Prandtl layer is the roughness height  $z_0$ . Prandtl layer size is regulated by the thermal stratification of the air and it can vary from 20 to 100m. In this layer turbulent fluxes are approximately constant with height, Coriolis force can be neglected and wind speed changes really quickly. Above the Prandtl layer is located the Ekman layer, which can reach and height of about 1000 m depending on the stability of the air. In this layer turbulent fluxes decrease to zero at the top and the Coriolis force causes the turning of the wind vector (Zdunkowski and Bott 2003).



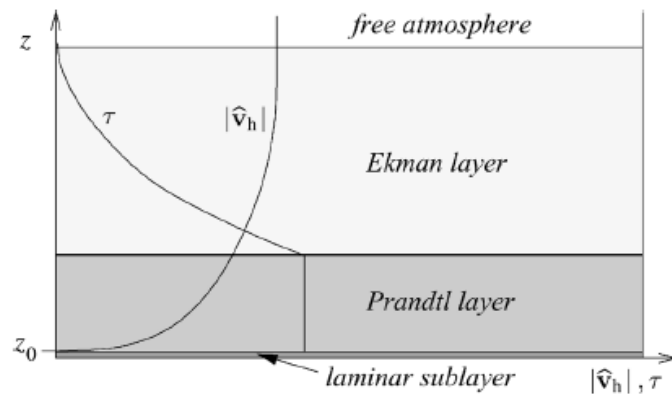


FIGURE 5: STRUCTURE OF THE PLANETARY BOUNDARY LAYER. HORIZONTAL WIND  $V_H$  AND STRESS  $\tau$  WITHIN THE BOUNDARY LAYER ARE ALSO SHOWN (ZDUNKOWSKI AND BOTT 2003)

Modeling the atmospheric boundary layer is a very difficult task. Most of its characteristics are defined by the terrain, as a consequence, they can vary quite a lot in a small distance. Also there are phenomenon's related with eddy transports and vertical fluxes that requires a very fine grid to be modeled properly. These grids are not affordable for a mesoscale numerical model so, special techniques must be developed in order to handle these processes in the ABL.

There are some specifically developed ABL schemes in the WRF model, when any of these ABL schemes is activated explicit vertical diffusion is de-activated with the assumption that the ABL scheme will handle this process. The ABL schemes determine the flux profiles within the well-mixed boundary layer and the stable layer, and thus provide atmospheric tendencies of temperature, moisture (including clouds), and horizontal momentum in the entire atmospheric column. The schemes are one-dimensional, they assume that there is a clear scale separation between sub-grid eddies and resolved eddies. This difference is more difficult to see when grid sizes are below a few hundred meters, where boundary layer eddies may start to be resolved, and in these situations the scheme should be replaced by a fully three-dimensional local sub-grid turbulence scheme such as the TKE diffusion scheme (Skamarock, et al. 2008).

The ABL models implemented in lage-scale atmospheric numerical models are largely divided into first-order or one-and-a-half order (TKE) closure schemes. The First-order closure schemes do not require any additional prognostic equations to express the effects of turbulence on mean variables, these models are MBL, YSU and ACM2. One-and-a-half order closure schemes (also known as TKE closure schemes) require one additional prognostic equation of the TKE, these models are MYJ, QNSE, MYNN and BouLac (Shin and Hong 2011).

- **Medium Range Forecast Model (MRF)** Described in (Hong and Pan 1996), This ABL scheme employs counter-gradient fluxes for heat and moisture in unstable conditions. In those conditions the vertical diffusion scheme based on local

gradients of wind and potential temperature (local- $K$  approach) cannot be expected to work properly. The turbulent diffusivity coefficients are calculated from a prescribed profile shape as a function of boundary layer heights and scale parameters derived from similarity requirements. The top Ekman layer height is determined from a critical bulk Richardson number ( $Ri$ ). It handles vertical diffusion with an implicit local scheme, and it is based on local  $Ri$  in the free atmosphere.

- **Yonsei University (YSU)** model is the actual version of the MRF model, described in (Hong, Noh and Dudhi 2006) it also employs countergradient terms to represent fluxes due to non-local gradients. This scheme includes an explicit treatment of the entrainment layer at the ABL top which is made proportional to the surface buoyancy flux. This proceed is in line with results from studies with large-eddy models (Noh, et al. 2003). The ABL top is defined using a critical bulk Richardson number of zero, so is effectively dependent on the buoyancy profile, in which the ABL top is defined at the maximum entrainment layer instead of the layer at which the diffusivity becomes zero.
- **Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)** model includes a parameterization of turbulence in the ABL and in the free atmosphere as proposed in (Janjic 2002). It is a nonsingular implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 turbulence closure model (Mellor and Yamada 1982) through the full range of atmospheric turbulent regimes. In this implementation, an upper limit (depending on the TKE as well as the buoyancy and shear of the driving flow) is imposed on the master length scale. The upper limit is defined: in the unstable case when the TKE production be nonsingular in the case of growing turbulence; in the stable range, when the ratio of the variance of the vertical velocity deviation and TKE cannot be smaller than that corresponding to the regime of vanishing turbulence. The TKE production/dissipation differential equation is solved iteratively.
- **Asymmetrical Convective Model version 2 (ACM2)**, as it is detailed in (Pleim 2007), includes the nonlocal scheme, which represents large-scale transport driven by convective plumes (but neglect small-scale subgrid turbulent mixing), combined with an eddy diffusion scheme. Thus, in convective conditions the ACM2 can simulate rapid upward transport in buoyant plumes and local shear induced turbulent diffusion. The partitioning between the local and nonlocal transport components is determined from the fraction of non-local heat flux employing the model proposed by (Holtslag and Boville 1993). The algorithm transitions smoothly from eddy diffusion in stable conditions to the combined local and non-local transport in unstable conditions. The ACM2 performs equally well for both meteorological parameters and trace chemical concentrations.
- **Quasi-Normal Scale Elimination (QNSE)** model, is a new model with stable and weakly unstable stratification. Detailed in (Sukoriansky, Galperin and Perov 2006) it does not separate turbulence and waves and treat them as one entity, which implies partial averaging and, thus, is scale-dependent. The main results of the theory are horizontal and vertical turbulent viscosities and diffusivities which can be normalized by eddy viscosity of neutral turbulent flow and then presented as functions of the local gradient Richardson number ( $Ri$ ) or Froude number ( $Fr$ ). The model has been implemented in the  $k$ - $\epsilon$  format and tested in simulations of the stably stratified atmospheric boundary layers.

- **Mellor-Yamada Nakanishi and Niino** model is provided in two different configurations: level 2.5 and level 3. Initially proposed in (M. Nakanishi 2001) and tested in (Nakanishi y Niino 2006) it predicts sub-grid TKE and other second-moment terms based on the LES data, closure constants are re-evaluated and a new diagnostic equation for the master length scale  $L$  is proposed, allowing it to vary with stability in the surface layer. This closure imposes additional restrictions on original MY closure parameters to assure its realizability and numerical stability. The choice of the level of the scheme (2.5 or 3) can be decided depending on available computer resources and user needs.
- **BouLaC** model, developed by (Bougeault and Lacarrère 1989) includes a TKE-prediction option based on parameterization schemes and it is implemented for use with Multi-Layer Urban Canopy Model (BEP).

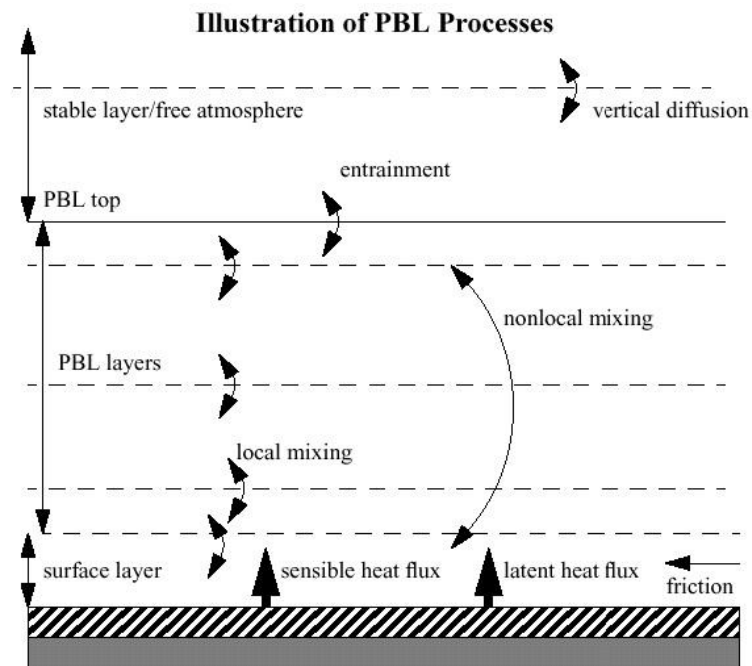


FIGURE 6: PROCESSES INSIDE THE PLANETARY BOUNDARY LAYER

### 2.1.2. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODELS

Solving fluid dynamics problems by means of computational analysis is commonly known as Computational Fluid Dynamics (CFD). This name covers techniques which allow to solve numerically the equations that governs fluids, usually called Navier-Stokes equations: continuity, momentum and energy equation. Although these techniques started to be used in the mid 60s, greatest advances take place at the end of the 20<sup>th</sup> century thanks to the impressive development of computers, which allow to resolve fluid governing equations quickly and accuracy (Date 2009).

### 2.1.2.1. Conservation principles and numerical solution

The continuity, momentum and energy equation are known as conservation principles and can be expressed as mathematical functions, usually called Navier-Stokes equations. Together with the perfect gas equation of state, can be used to calculate the fluid's velocity ( $\mathbf{V}$ ), temperature ( $T$ ), pressure ( $p$ ) and density ( $\rho$ ). These equations are (Meseguer Ruiz, et al. 2001):

1. Continuity equation:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (6)$$

2. Momentum equation:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{F} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}' \quad (7)$$

Where  $\rho \mathbf{F}$  are the mass dependant forces and  $\boldsymbol{\tau}'$  the viscous stress tensor.

3. Energy equation:

$$\rho \left\{ \frac{\partial e}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) e \right\} = -p \nabla \cdot \mathbf{V} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi_v - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \dot{Q} \quad (8)$$

Where  $e$  is the internal fluid energy per mass unit,  $k \nabla T$  is the conductive heat flux,  $\mathbf{q}_r$  is the radiation heat flux,  $\Phi_v$  is the Rayleigh dissipation function and, finally,  $\dot{Q}$  is the heat addition by any other method.

To solve these equations, each problem imposes its own boundary and initial conditions which allow to solve the problem numerically.

It is almost impossible to find an analytical solution for the Navier-Stokes equations, and it is only feasible when large amount of simplifications are made, allowing to reduce the dimensions number or removing terms which are negligible (Anderson 1995). To obtain numerical solutions space and equations must be discretized, in such way; the solution is only obtained at certain points of the control volume, which are defined by a mesh. Algorithms implemented in CFD software iteratively resolve the equations applied over the mesh.

### 2.1.2.2. The Atmospheric Boundary Layer: modeling a turbulent flow

The Atmospheric Boundary Layer (ABL) is a turbulent flow, so it is very important to know how to model properly the turbulence in order to obtain numerical solution with enough accuracy. Turbulence flow modeling is a very complex topic which has been investigated for several decades, is still under development and requires a whole book just for a review (Pope 2009). In a turbulent flow its behavior is random and chaotic, the

motions becomes intrinsically unsteady even with constant imposed boundary conditions. The velocity, as well as other flow properties, varies in a random and chaotic way (Figure 7) so, in the equations, velocity is decomposed into a steady mean value  $U$  with a fluctuating component  $u'(t)$  superimposed on it:  $u(t) = U + u'(t)$ . This is called the Reynolds decomposition, and allows to characterize a turbulent flow in terms of the mean values of flow properties ( $U, V, W, P$  etc) and some statistical properties of their fluctuations ( $u', v', w', p'$  etc.) (Versteeg and Malalasekera 2007). These fluctuating terms increases equations complexity and specific turbulence models must be created in order to solve them.

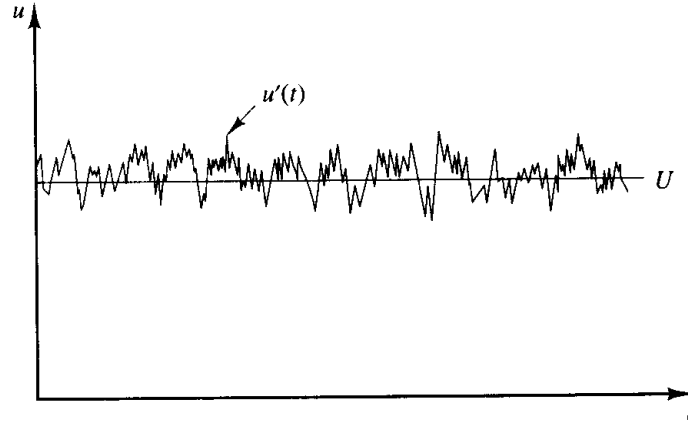


FIGURE 7: INSTANTANEOUS VELOCITY MEASURED IN ONE POINT IN TURBULENT FLOWS

#### 2.1.2.2.1. The $k$ - $\epsilon$ turbulence model

The  $k$ - $\epsilon$  (or  $k$ - $\epsilon$ ) is the most widely used and validated turbulence model, and it is incorporated in most commercial CFD codes (Pope 2009). It focuses on the mechanisms that affect the turbulent kinetic energy and transport equations are solved for two turbulence quantities,  $k$  and  $\epsilon$ , where  $k$  is the turbulent kinetic energy

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (9)$$

and  $\epsilon$  is the rate of viscous dissipation, the dissipation of turbulent kinetic energy is caused by work done by the smallest eddies against viscous stresses. The rate of dissipation per unit mass, whose dimensions are  $m^2/s^3$ , is of vital importance in the study of turbulence dynamics and is denoted by (Versteeg and Malalasekera 2007):

$$\epsilon = 2\nu \overline{u'_{ij} \cdot u'_{ij}} \quad (10)$$

Although it is possible to develop transport equations, similar to those exposed in 2.1.2.1, for all turbulence quantities, these exact equations contain many unknown and unmeasurable terms. The standard  $k$ - $\epsilon$  model (Launder and Spalding 1974) has two model equations, one for  $k$  and one for  $\epsilon$ . The definition of the turbulent viscosity ( $\mu_t$ ) is also required:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

Where  $C_\mu$  is a dimensionless constant. Also Boussinesq relationship for the Reynolds stresses should be considered:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (12)$$

The standard model uses the following transport equations used for  $k$  and  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right] + 2\mu_t \tau_{ij} - \rho \varepsilon \quad (13)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t \tau_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (14)$$

The equations contain five adjustable constants  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_{1\varepsilon}$  and  $C_{2\varepsilon}$ . The standard  $k$ - $\varepsilon$  model employs values for the constants (Launder and Spalding 1974) that are arrived at by comprehensive data fitting for a wide range of turbulent flows:

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_\varepsilon = 1.30 \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad (15)$$

Production and destruction of turbulent kinetic energy are always closely linked because when the production of  $k$  is large the dissipation rate  $\varepsilon$  is large too. As it's shown in equation (14), the model assumes that production and destruction terms of  $\varepsilon$  are proportional to the production and destruction terms of  $k$  (13). This ensures that  $\varepsilon$  increases rapidly if  $k$  increases rapidly and that it decreases sufficiently fast to avoid negative values of turbulent kinetic energy if  $k$  decreases (Versteeg and Malalasekera 2007).

### Performance

The  $k$ - $\varepsilon$  model is arguably the simplest complete turbulence model, and hence it has the broadest range of applicability. It is usually acceptably accurate for simple flows and the inaccuracies stem from the turbulent-viscosity hypothesis and from the  $\varepsilon$  equation. The values of the standard model constants represent a compromise and, for any particular flow, it is likely that the accuracy of the model calculations can be improved by adjusting the constants. However, for a generally applicable model, a single specification of the constants is required and the standard values represent a compromise chosen to give the 'best' performance for a range of flows (Pope 2009). Also, several modifications to the standard model have been proposed, usually to remedy poor performance for a particular class of flow, and this Thesis is an example of a similar effort.

#### 2.1.2.2.2. How to model the Atmospheric Boundary Layer

Some difficulties must be usually faced in order to properly simulate the Atmospheric Boundary Layer. Probably, the more important one is related with the need of obtain, in the whole simulated domain, a fully developed and horizontally homogeneous boundary layer. These conditions are critical to obtain successful results, as it has been shown in several research works like (Yang, et al. 2009) or (Blocken, Stathopoulos and Carmeliet 2007). Many computational wind engineering problems are sensitive to the approach flow velocity and turbulence property profiles. Although appropriate inlet conditions are specified, unless these are in balance with: the turbulence model, the ground wall functions and the boundary conditions used to drive the flow; these profile can change significantly just due to improper modeling (Richards and Norris 2011).

Usually, as it is necessary obtaining a fully developed ABL, velocity profiles and turbulence levels at the inlet must be in equilibrium and be representative of the terrain roughness upstream simulated domain (Blocken, Stathopoulos and Carmeliet 2007). Such velocity profiles can be calculated choosing the correct aerodynamic roughness  $z_0$  or the  $\alpha$  coefficient for the exponential law (Wieringa 1992).

Inside computational domain is quite usual that obstacles and terrain irregularities are implicitly modeled, in other words, its geometry is not included in the domain but the effect over de flow can be modeled thanks to the roughness, employed by the wall functions during the CFD simulation. Commonly, it is considered that roughness terrain upstream and downstream computational domain is the same, because it's not the intention of the simulation the development of an Internal Boundary Layer inside the domain. An important exception should be considered when roughness height abruptly changes inside the domain. This can happen at certain locations like airfields, where the terrain surrounding the airport could be an urban area with high aerodynamic roughness. The velocity profile arrives to the airfield, where the roughness is very low, and an Internal Boundary Layer is developed according to the new roughness value. (Meseguer Ruiz, et al. 2001).

When the achievement of a horizontal homogeneous ABL is a desired condition for terrains with constant roughness, no velocity or turbulence gradients can exist in the flow direction. This can be achieved when velocity and turbulence are in equilibrium with terrain roughness (Blocken, Stathopoulos and Carmeliet 2007). Several authors have recognized that it is quite difficult to obtain a horizontal homogeneous ABL inside the computational domain, in this way (Richards y Younis 1990) considering the work realized by (Mathews 1987) pointed that changes in velocity and turbulence occurred near the inlet and in the lower region of the ABL, near the ground. These simulations were conducted with the  $k-\epsilon$  turbulence model, with its standard wall functions, as it was developed by (Launder and Spalding 1974). Related with this model, (C. X. Zhang 1994) pointed that accurate results could be achieved for mean velocity and pressure distribution but turbulent kinetic energy was underestimated, due to this reason, strong differences could exist between CFD models and experimental measurements.

Most researchers claimed that these differences in the simulated atmospheric boundary layer are produced by inadequate boundary conditions, especially in terrain surface.

2.1.2.2.3. *K-Epsilon model for Atmospheric Boundary Layer simulation: Richard and Hoxey proposal.*

It has been the case for the last decade that the  $k-\varepsilon$  turbulence model and its variants have been the most widely used models in wind engineering problems. The majority of the research relating to the  $k-\varepsilon$  model and its variants (see review by (Stathopoulos 2002)) has been concerned with the performance and, most successful among these workers who have addressed the modeling of the ABL using CFD are (Richards and Hoxey 1993) as it was pointed by (Hargreaves and Wright 2007). Hargreaves' work shows that, when commercial software is used with the default law of the wall, the velocity and turbulence profiles decay but, by applying all boundary conditions proposed by Richards and Hoxey, it has been shown that the velocity of the ABL can be sustained along the length of the computational domain.

(Richards and Hoxey 1993) made the following assumptions in attempting to model an homogeneous ABL:

- a) The vertical velocity is zero
- b) The pressure is constant in both the vertical and streamwise directions.
- c) The shear stress is constant throughout the boundary layer. Taking the momentum equation for an incompressible flow with the Reynolds Averaged Navier Stokes approach:

$$\rho \left( \frac{D\bar{u}_i}{Dt} \right) = \rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (16)$$

It can be simplified by:

- Under equilibrium conditions total rate of change must be zero.
- No vertical velocity.
- Only non-zero derivatives are with respect to the vertical direction.
- Reynolds stresses are much larger than the viscous stresses, so the latter may be ignored.
- The only non-zero Reynolds shear stress is  $\tau_{13} = -\rho \overline{u'_1 u'_3} = -\rho \overline{u'_w} = \tau$ .

And the result is:

$$\rho \left( \frac{D\bar{u}_i}{Dt} \right) = 0 = \frac{d}{dz} - \rho \overline{u'_i u'_j} = \frac{d\tau}{dz} \quad (17)$$

The magnitude of the driving shear stress may be characterized by the friction velocity  $u_*$  through  $\tau = \rho u_*^2$ .



- d) The turbulent kinetic energy,  $k$ , and the dissipation rate,  $\varepsilon$ , satisfy their respective conservation equations (13) and (14), which under horizontally homogeneous conditions reduce to,

$$\frac{Dk}{Dt} = 0 = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \tau \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \rho \varepsilon \quad (18)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = 0 = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{1\varepsilon} \tau \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (19)$$

Where  $\mu_t$  is given by eq. (11) and constants  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_{1\varepsilon}$  and  $C_{2\varepsilon}$  have assigned their usual values (15).

Equations (11) and (12) give:

$$\tau = \rho u_*^2 = \mu_t \left( \frac{du}{dz} \right) = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{du}{dz} \quad (20)$$

Reordering (20) terms to give an expression for  $\varepsilon$  and introducing it in (18):

$$0 = \rho u_*^2 \frac{du}{dz} - C_\mu \rho \frac{k^2}{u_*^2} \frac{du}{dz} + \frac{d}{dz} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{dk}{dz} \right)$$

It has a simple solution:

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (21)$$

There is a local balance between production and dissipation, then, from eq. (18)

$$\varepsilon = \frac{\tau}{\rho} \frac{du}{dz} = u_*^2 \frac{du}{dz} \quad (22)$$

Substituting it in (19) the solution is not obvious but yields to (Richards and Norris 2011):

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z' + z_0)} \quad (23)$$

Now, substituting (23) into eq. (20) and integrating it leads to

$$u = \frac{u_*}{K} \ln \left( \frac{z'}{z_0} \right) \quad (24)$$

This two equations can be rearranged moving the origin to the current location where  $z' = z_0$  this means  $z = z' - z_0$

Thus, Richards and Hoxey boundary conditions have been calculated, leading to a logarithmic velocity profile:

$$u = \frac{u_*}{K} \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) \quad (25)$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (26)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z + z_0)} \quad (27)$$

Where  $\kappa$  is von Karman's constant and  $z_0$  is the roughness length. Eq. (25) is a standard representation of the velocity profile in the ABL, as it was explained in section 2.3. Also, they noticed that equations (25), (26) and (27) satisfy eq. (18) automatically, but equation (19) only when

$$\sigma_\varepsilon = \frac{\kappa^2}{(C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1})\sqrt{C_\mu}} \quad (28)$$

This gives a value of 1.11 for  $\sigma_\varepsilon$  if  $\kappa = 0.4$ .

#### 2.1.2.2.4. Some additional considerations on modeling

As it was mentioned before, the wind speed and turbulent inlet profiles are usually representative of the roughness characteristics of the upstream domain, which is usually expressed by the appropriate aerodynamic roughness length  $z_0$  or the power-law exponent  $\alpha$ . However, wall functions in CFD codes are usually based on the sand-grain roughness height  $k_s$ , which is usually quite high in the ABL according with (Wieringa 1992), who pointed that for  $z_0$  in the range 0.03–2 m, the equivalent  $k_s$  is in the range 0.9–60 m.

Because of this, when the wall roughness is expressed by an equivalent sand grain roughness  $k_s$  in the wall functions, four requirements should be simultaneously satisfied, as it was distilled from various sources in (Blocken, Stathopoulos and Carmeliet 2007):

1. A sufficiently high mesh resolution in the vertical direction close to the bottom of the computational domain (e.g. height of first cell < 1 m).
2. A horizontally homogeneous ABL flow in the upstream and downstream region of the domain.
3. A distance  $y_p$  from the centre point P of the wall-adjacent cell to the wall (bottom of domain) that is larger than the physical roughness height  $k_s$  of the terrain.
4. Knowing the relationship between the equivalent sand-grain roughness height  $k_s$  and the corresponding aerodynamic roughness length  $z_0$ .

Also in (Blocken, Stathopoulos and Carmeliet 2007) is mentioned that the relationship between  $k_s$  and  $z_0$  in the ABL can be established respectively as:

$$k_s = 30z_0 \quad (29)$$

$$k_s = \frac{9.793z_0}{C_s} \quad \text{Fluent} \quad (30)$$

$$k_s = 29.6z_0 \quad \text{Ansys CFX} \quad (31)$$

Clearly, in all cases,  $k_s$  will often be very large in ABL simulations and the fulfillment of all four requirements mentioned previously is almost impossible.  $y_p$  must be greater than  $k_s$  and it is obvious that this requirement conflicts with the need for a high grid resolution near the ground and that no accurate solutions in this region can be obtained with cell sizes so large, as it was pointed in (Franke, Hirsch, et al. 2004).

Some remedial measures were proposed by (Blocken, Stathopoulos and Carmeliet 2007) to solve this problem:

1. Explicit modeling of roughness elements, for example including some orographic details. In this case, sand-grain roughness wall functions can be used to model the small-scale roughness of the surface.
2. Avoid the  $y_p > k_s$  requirement. Although it seems logical because it is not physically meaningful to have grid cells with centre points within the physical roughness height, from a numerical point of view the reasons are less clear and it is possible to avoid this requirement with an appropriate CFD code formulation.
3. Instead of  $k_s$  type wall functions,  $z_0$  type wall functions can be used in which the roughness is expressed as a function of the aerodynamic roughness length  $z_0$  instead of  $k_s$ .

Richard and Hoxey approach employs its own wall functions, which are based on the aerodynamic roughness length. These type of wall functions are reported to perform well in producing horizontally homogeneous ABL flow (Bitsuamlak, Stathopoulos and Bedard 2004).

## 2.2. COUPLING MESOSCALE AND CFD MODELS

During the last few years, a new research field in the area of ABL has experienced a strong development. It is related with coupling mesoscale and CFD model capabilities in order to obtain a more accurate and powerful tool for wind studying and forecasting.

CFD is able to model the details of flow around specific geographic and man-made features; on the other hand, mesoscale models incorporate information representing the outer scale geophysical variability through evolving boundary conditions and by assimilating observations of the current state of the atmosphere to predict flow characteristics (Zajackowski, Haupt and Schmehl 2011). Both models work in a very different way, the governing equations, spatial and temporal scales and coordinate systems are quite different. Due to this reason, there are technical difficulties when interfacing such models (Mochida, et al. 2011).

Traditionally, in CFD simulations of the ABL, boundary conditions were given based on very limited measured data or analytical relationships, like logarithmic wind profiles, which can be assumed only for homogeneous terrain roughness. These methods have serious limitations in predicting inhomogeneous areas like cities or complex terrains where the inflow conditions are strongly influenced by larger-scale meteorological phenomena (Mochida, et al. 2011).

Several methods have been used to couple CFD and mesoscale models and they can be grouped into four categories, as it is suggested in (Yamada and Koike 2011):

1. Mesoscale model results are used as the boundary conditions for a CFD model, This is the most common approach, and probably the easiest one, to implement meteorological influences into CFD applications. Must be pointed that the mesoscale model does not include CFD capabilities and the CFD model does not include mesoscale capabilities, each of them is autonomous software. Nevertheless, a coupling of them accomplishes the objectives. This method was employed in (Schlünzen, et al. 2011) or (Liu, Warner, et al. 2011).
2. Up-scaling a CFD model to include Mesoscale capabilities, this method is also known as “single-model up-scaling”
3. Down-scaling an mesoscale model to include some CFD model capabilities “single-model downscaling”

Both methods are equivalent and the result is just a single model. Phenomena are simulated interactively and seamlessly by nesting the computational domains; in those domains with low resolution the mesoscale model is applied whilst the CFD model is applied in the high resolution domain with small grid elements. In other words, the mesoscale variations are reflected into the CFD simulations and the CFD results are returned to the mesoscale model by using a two-way nesting method. Anyway, this is a quite complex method which requires large software modifications. Both methods have been employed in some works, like (T. Yamada 2004) or (Schlunzen, et al. 2003).

4. Hybrid of the previously discussed methods. For example, a mesoscale model provides boundary conditions to a “single-model up-scaling” or a “single- model downscaling” model. (Yamada and Koike 2010) coupled A2C with WRF where WRF provided the boundary conditions to A2C and (Li, et al. 2010) coupled FLUENT with RAMS where RAMS provided the boundary conditions to FLUENT.

Zajackowski, Haupt and Schmehl employ the output of the WRF model with Four – Dimensional Data Assimilation to initialize and assimilate data into CFD simulations with much finer grid resolution. This approach avoids two important difficulties present in methods with nested domains (Zajackowski, Haupt and Schmehl 2011):

- a. Since both models use a subgrid model to parameterize the unresolved turbulent cascade to smaller scales, the dissipation could be “double counted”.
- b. The turbulence parameterization must span the “terra incognita”, defined as the range between the validity of the mesoscale models and LES models.

In this case two different methods were employed in order to incorporate WRF data into the CFD model: using WRF data as inflows conditions for the CFD and assimilating vertical profiles provided by the WRF into the CFD model by means of nudging techniques.

This approach, based on boundary conditions provided by a mesoscale model and used in a CFD model with fine-scale topographic features and human made structures, will be the selected one in this work.

At this point, boundary values have to be passed on to the CFD from the mesoscale model. In general, three different methods have been developed (Schlünzen, et al. 2011):

- **Time-slice approach:** It is the simplest method. It employs steady basic state profiles derived from a mesoscale model at fixed times, then the CFD is run in each time-slice with a steady solver, the wind profile passed from the mesoscale model is maintained during the whole time-slice. The time-slice employed in such approach is much larger than the time step of the mesoscale model. The CFD is initialized with a basic state profile at certain time slice and then it is able to develop its own solution, which will be influenced by the features inside the CFD domain. It has been proved that the time slice approach with steady basic state profiles can deliver reliable results not only for meteorological but also for chemical models (Schlünzen, et al. 2011).
- **One-way nesting:** It has been widely used in mesoscale models in order to run multiple nests and nest levels. Similar to the time-slice approach, the data are taken from the mesoscale model at fixed times (known as update times). In this method the information of the mesoscale model is used dependent on time and space in the CFD, not only a single wind profile is employed. Also, a transient solver is usually employed and the boundary conditions are frequently updated with mesoscale model data. The horizontally inhomogeneous structure of the mesoscale results is passed to the CFD for the initialization either by using a 4D-Var technique or a nudging approach.
- **Two-way nesting:** It allows to include a feedback from the CFD to the mesoscale model. The mesoscale results are passed to the CFD every mesoscale time step or, by means of linear interpolation, every CFD time step. Then, the CFD is integrated until the next mesoscale time step is reached. The fluxes (or parameters) are aggregated and fed to the mesoscale model, which is integrated for the next time step. Both models can be run as a two separate codes of different scale or they can be combined in a single code as a multi-scale model with non-uniform grids (Schlünzen, et al. 2011). Employing the two-way nested or multi-scale model some important limitations are underlined, for example abrupt changes in grid-size can result in wave reflections. It was pointed in (Schroeder and Schlünzen 2009) that refinement factor between nested grids should not exceed 3 in order to avoid wave reflections.

### 2.3. WIND FIELD MEASUREMENT AND INVOLVED TECHNOLOGIES

Our fundamental understanding of the boundary layer comes from measurements. A large variety of sensors and techniques have been developed to acquire a variety of boundary layer data.

#### 2.3.1. THE LOG WIND PROFILE

A common method to determine the wind speed above 10 meters from ground is to locally measure at this height and then to extrapolate the data. Thus, it is possible to calculate the wind speed by using compact expressions like (32) or some others, simpler, like the exponential equation (33) (Pérez, et al. 2005) or the logarithmical one (34) (Johnson 1999), adapted from (32) for thermally neutral conditions.

$$U(h) = \frac{u_*}{\kappa} \left[ \ln \frac{h}{z_0} - \xi \left( \frac{h}{L} \right) \right] \quad (32)$$

$$U(h) = u_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (33)$$

$$U(h) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{h}{z_0} \right) \quad (34)$$

In these equations  $u$  is the wind speed [m/s],  $u_*$  is the friction velocity [m/s],  $\kappa$  is the Von Karman constant,  $h$  is the height above the ground [m] at which wind speed is calculated,  $z_0$  is the surface aerodynamic roughness [m],  $\xi$  represents the effect of stability of the air column on the wind velocity,  $L$  is a length scale (Monin-Obukhov length), which is associated with the thermal stratification of the atmosphere and the mixing process involved,  $U_0$  is the wind speed at known elevation (commonly 10 m),  $h_0$  is the height of the lowest level of measurements and  $\alpha$  is the power law exponent which depends on the surface roughness.

The aerodynamic roughness length  $z_0$ , is a very important parameter. It is defined as the height where the wind speeds becomes zero and its only true determination is from measurements of the wind speed at various heights. Although this roughness is not equal to the height of the individual roughness elements on the ground, there is a correspondence between them and, once it is determined for a particular surface, it does not change with wind speed, stability, or stress (Stull 2009).

When plotted on semi-log graph paper, the logarithmic relationship such as the wind profile in statically neutral situations appears as a straight line. For non neutral situations, the wind profile deviates slightly from logarithmic. In stable boundary layers, the wind profile is concave downward, while unstable boundary layers are concave upward (Stull 2009).

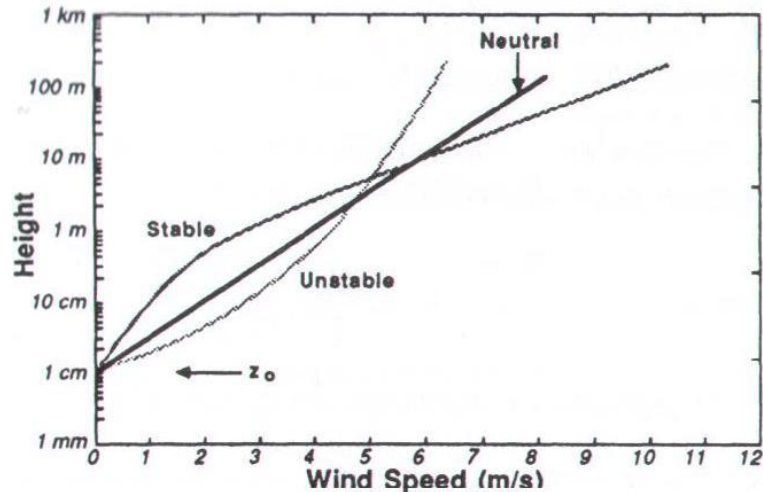


FIGURE 8: TYPICAL WIND SPEED PROFILES UNDER DIFFERENT ATMOSPHERIC CONDITIONS (STULL 2009)

It is not easy to know the magnitude of the deviation, so, when a precise knowing of the wind speed profile is needed, the previous equations are not enough. During the last decades several systems have been developed, with more or less capabilities, to determine the variation of wind speed with height above the ground: meteorological towers, LIDAR, SODAR, observation balloons or satellites are some examples.

### 2.3.2. METEOROLOGICAL TOWERS

Meteorological towers are probably the most common resource for measuring the wind speed and direction at a site and they can be considered as a special version of a conventional meteorological station. A meteorological tower is a tall, tubular steel tower whose height is about 40 or 50 m (although some specific designs reach 120 meters), with tower diameters of approximately 6-8 inches (Renewable Energy Research Laboratory s.f.).

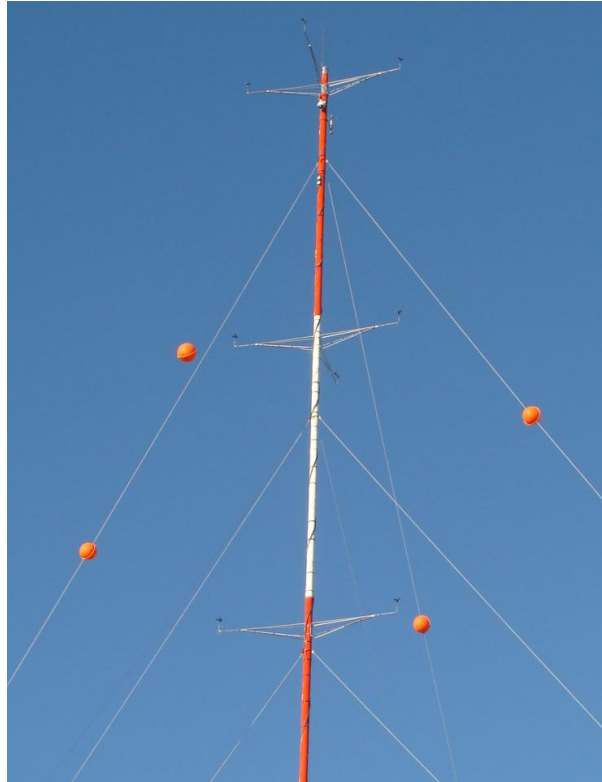


FIGURE 9: A 120 M METEOROLOGICAL TOWER

The wind speed and direction are measured using anemometers for the wind speed and wind vanes for the direction, they are located at different heights (at least two) on the tower. At each height, sensors are attached at the end of a boom, horizontally separated from the mast. Thus, there are usually three booms at each height, and the booms for the anemometers are positioned in opposite directions. Thanks to positioning the sensors away from the tower, the perturbation of the tower wake in the measurements is mitigated. Measurements are taken at given time intervals and then the mean value is provided. These data are recorded and stored by a logger box at the bottom of the tower, which is connected to the sensors.

Obviously meteorological towers have a great advantage over conventional meteorological stations as long as they can measure wind speed (besides other parameters) at different heights, so they can obtain a much more accurate wind speed profile for the atmospheric boundary layer. On the other hand they cannot be moved from the initially selected location and the installation effort is quite important.

### 2.3.3. DOPPLER RADAR

Weather radars send out electromagnetic waves as short pulses which may be reflected by objects in their path, so part of the original signal comes back to the radar. Weather radars are designed to detect rain drops, hail or snow and from the intensity of the returned signal can be estimated how heavy the rainfall is and where it is located. By proper scan



strategies together with some a priori assumptions like actual wind field and that the particles move with the wind, wind field estimations are possible. The Doppler velocity is estimated from the phase shift between the return signals of consecutive transmitted pulses, any changes in phase can be related to motion of the reflecting particles (Meischner 2004).

Some important facts are derived from its operational principle. On the one hand, the Doppler velocity can be estimated only within the interval given by the wavelength of the radar ( $\lambda$ ) and the pulse repetition frequency (PRF):

$$V_{max} = \pm \frac{\lambda}{4\Delta t} \quad (35)$$

where PRF is equal to  $1/\Delta t$ . Also the PRF defines the maximum detection range:

$$r_{max} = c \frac{\Delta t}{2} \quad (36)$$

Range for unambiguous measurements of the Doppler velocity may be extended significantly by use of two different pulse repetitions frequencies, as well as other modern techniques.

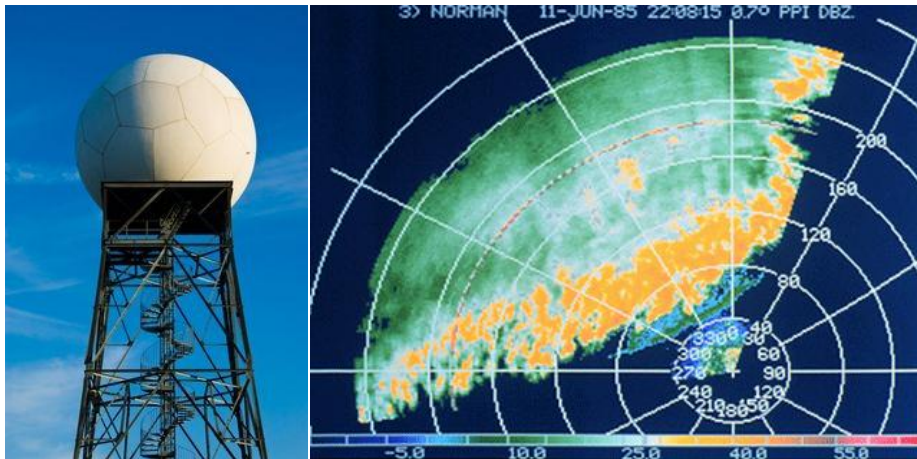


FIGURE 10: A DOPPLER METEOROLOGICAL RADAR (LEFT) AND AN EXAMPLE OF THE OBTAINED MEASUREMENTS (RIGHT)

The wind velocity can be separated into two components known as the radial and transverse components. The radar is only able to sense the motion along the radial direction, either towards or away from the radar, because the transverse component does not produce any Doppler effect on the returning electromagnetic wave and, consequently, the radar can't get any measurement. Hence the total wind speed is not measured, only the portion that is directed towards or away from the radar. This is important to understand Doppler wind images and it could be an important limitation, especially when the orography produces great changes in the wind fields.

If more than one Doppler radar is covering the area of interest, multiple Doppler methods may be applied. A convenient distance between the two radar systems is 30 to 40 km (Meischner 2004). Furthermore, recent developments enable more efficient measurements of different wind components if a single Doppler radar system is

complemented with one or more separate remote and coherently receiving bistatic antennas. This technique is more economical and easy to handle if it is compared with the operation of multiple complete Doppler radars.

Doppler radar limitations are mainly due to anomalous propagation of electromagnetic waves (as a consequence of temperature gradients as well as other atmosphere phenomenon's), ground clutter or non-natural interferences like wind farms (Newman, LaDue and Heinselman 2008). Also, as they just measure hydrometeors, if there are none of them the Doppler radar would not be able to measure any wind speed.

#### *2.3.4. LIGHT DETECTION AND RANGING (LIDAR)*

Light detection and ranging (LIDAR) is one of the backbones of the research field that deals with the profiling of the atmosphere. High spatial and temporal resolution of the measurements, the possibility of observing the atmosphere at ambient conditions, and the potential of covering the height range from the ground to more than 100 km altitude make up the attractiveness of LIDAR instruments. It allows the determination of several atmospheric variables, i.e., temperature, pressure, humidity and, of course, wind (Weitkamp 2005).

Lidar systems for wind velocity measurements have demonstrated their efficacy in many different applications where spatially resolved measurements of atmospheric wind velocity from a remote location are needed. Examples include: measurement of aircraft true airspeed, detection and tracking of clear air turbulence, wind shear, gust fronts, aircraft wake vortices, and measurement of atmospheric wind profiles (Fujii y Fukuchi 2005).

The basic setup of a LIDAR system is shown in Figure 11 and is quite straightforward. It consists of a transmitter and a receiver. Short light pulses with lengths of a few to several hundred nanoseconds and specific spectral properties are generated by the laser in the transmitter unit. At the receiver end, a telescope collects the photons backscattered from the atmosphere and they are redirected to an optical analyzer system which selects specific wavelengths or polarization states out of the collected light (Weitkamp 2005).

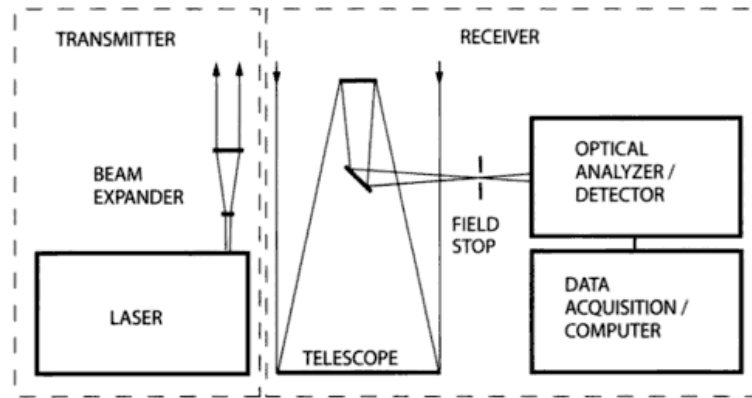


FIGURE 11: PRINCIPLE SETUP OF A LIDAR SYSTEM (WEITKAMP 2005)

The system must measure the Doppler frequency shift. In coherent detection LIDAR (one of the several developed techniques) the signal is mixed with a local oscillator beam and then detected with a photodetector. The resulting beat signal is a radio frequency (RF) photocurrent whose frequency, which can be estimated using digital or analog frequency discrimination techniques, is a direct measure of the Doppler shift. This Doppler shift is used to deduce wind velocity.

Historically, the primary factors limiting more widespread use of Doppler LIDAR systems have been the reduced performance in adverse weather, the lack of reliable and near autonomous operation, and the high cost (Fujii y Fukuchi 2005).

### 2.3.5. SOUND DETECTION AND RANGING (SODAR)

Sound detection and ranging (SODAR) is a weather observing device that uses sound waves to detect the wind speed and direction at various elevations above the ground. In a typical implementation, the SODAR can sample along each of the three beams: one is aimed vertically to measure vertical velocity, and two are tilted off vertical and oriented orthogonal to one another to measure the horizontal components of the air's motion (Cimini, Marzano and Visconti 2010).

Two kinds of SODARs antennas have been developed (Emeis 2011):

- Classical SODAR uses three large tiltable antennas to focus the beams, in this case sound transducers serve as emitters as well as receivers.
- Phased-array SODAR has a large number of smaller sound transducers. By using the interference principle, slanted and vertical beams are formed by operating the various sound transducers with specified time delays among each other.



FIGURE 12: ANTENNA SODAR FOR WIND AND TURBULENCE PROFILE MEASUREMENTS UP TO ABOUT 1000 M ABOVE GROUND



FIGURE 13: PHASED-ARRAY SODAR FOR WIND AND TURBULENCE PROFILE MEASUREMENTS UP TO SEVERAL HUNDREDS OF METERS ABOVE GROUND

A profile of the atmosphere as a function of height can be obtained by analyzing the return signal at a series of times following the transmission of each pulse. The return signal recorded at any particular delay time provides atmospheric data for a height that can be calculated based on the speed of sound (Cimini, Marzano and Visconti 2010). For a pulse two parameters must be chosen: frequency is a compromise between attenuation of the signal (which increases with the frequency) and the environmental noise; the pulse duration is a trade-off between height resolution (preferably short pulse durations) and maximum range (preferably long durations).

For an optimal system performance reflected pulse must be as intense as possible, the attenuation of propagating acoustic energy increases as a function of decreasing temperature and decreasing humidity, this way, in cold and dry weather the return signal can be extremely low.

When a reflected pulse is collected, the received Doppler frequency is computed and converted in wind velocity through the relation:

$$v = \frac{c_a}{2} \left( \frac{f_d}{f_0} \right) \quad (37)$$

Where  $c_a$  is the sound velocity,  $f_d$  the Doppler shift, and  $f_0$  the frequency of the pulse. For example, if  $f_0 = 2000$  Hz we will have a shift equal to 12 Hz in frequency for every m/s of wind velocity (Cimini, Marzano and Visconti 2010).

One of the most important problems with SODAR systems is ground clutter, SODAR beams have side lobes, and therefore, fixed echoes can severely influence and disturb SODAR measurements, because reflected side lobe energy can overcome the atmospheric return signal. This requires a good site selection, far away from obstacles like buildings, trees, and electric cables. Also, sound pulse is detectable for human ears at a distance of several hundreds of meters, thus, sitting of SODARs close to populated locations has to be avoided (Emeis 2011).

### 2.3.6. OBSERVATION BALLOONS

Balloons are ideal for gathering meteorological information and have been used for that purpose for centuries; they can climb through the denser air close to the Earth to the thinner air in the upper atmosphere carrying a package of instruments and collecting data about wind, pressure or temperature as they travel. Each of the weather stations that form part of the network monitoring the upper air releases one radiosonde at midnight and noon Greenwich time every day. Releasing all the balloons at the same time allows data from them to be compiled into a picture of conditions throughout the world at the time (Allaby 2002).

Another kind of observation balloons carries only a radar reflector, radar tracking of these balloons provides, by noting the position of the sonde at intervals, the vertical profile of wind speed and direction and the way these change with height (Mahapatra 1999).

Conventional balloons are about 1.5 m in diameter and filled with helium, it carries an instrument package at the end of a cable 30 m long in order to prevent instrument reading by effects from the balloon itself. At certain height between 20 and 30 km the balloon bursts and the instrument package return to the surface by means of a parachute, although just about one-quarter of the packages released are recovered to be used again (Allaby 2002).

Much bigger balloons are used for upper-atmosphere research. These are only partly filled before launch and, as they ascend, the helium expands to inflate the balloon fully. These research balloons are designed to return data from the middle and upper stratosphere.

### 2.3.7. SATELLITES

Satellites are a valuable tool utilized to forecast the weather because they can provide cloud images and an accurate profile of temperature and moisture at different levels in the atmosphere thanks to a special radiometer called a *sounder* (Ahrens 2008). However, measuring wind speed from spacecraft is more difficult and, mainly, there are two ways:

- Wind scatterometer, which primary application has been measure near-surface winds over the ocean. It is designed to determine the normalized radar cross section ( $\sigma_0$ ) of the Earth surface. By combining  $\sigma_0$  measurements from different azimuth angles, the near-surface wind vector over the ocean's surface can be determined using a geophysical model function (GMF) which relates wind and backscatter. Over the ocean, the radar backscatter results from scattering from wind-generated capillary-gravity waves, which are generally in equilibrium with the near-surface wind over the ocean. The backscattered power depends on the wind speed and direction. Viewed from different azimuth angles, the observed backscatter from these waves varies. These variations can be used to estimate the sea surface wind, i.e. its speed and direction (Naderi, Freilich and Long 1991).

- Spaceborne LIDAR: the interest toward spaceborne active sensors incorporating a pulsed laser transmitter started during the 1980s, when the maturity of the CO<sub>2</sub> laser technology and the high electrical-to-optical efficiencies achievable for coherent Doppler Wind Lidar (DWL) detection systems marked the design and experimental work in this field (Nava and Stucchi 2003). Although the program has suffered several delays the ESA expects to launch it at the end of 2013. It carries the instrument called ALADIN, which is based on the Direct Detection Doppler Wind Lidar concept, which operates in the near UV band (355 nanometres) and uses a telescope for both emission and reception. It is an active instrument which fires laser pulses towards the atmosphere and measures the Doppler shift of the return signal, backscattered at different levels in the atmosphere. It combines a fringe-imaging receiver (analysing aerosol and cloud backscatter) and a double-edge receiver (analysing molecular backscatter) in a single instrument. These measurements will create a wind profile showing the relative strength and direction of winds at different altitudes. Measurements will be taken every 0.1 seconds and then averaged over 7- second period (during that time the satellite will have travelled 50km) to obtain wind profiles from altitudes from 0 to 16km with an accuracy of about 1 m/s from 0 to 2 km and about 2 m/s from 2 to 16 km, it can obtain also measurements up to 30km with less accuracy (EADS Astrium 2009).

Satellites are an impressive tool for global wind and weather forecasting because they can take measurements all around the world. Nevertheless, these measurements are not available from any place at any time, because they only repeat ground track every several days.

### 3. INTEGRACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS DE MESOESCALA Y MICROESCALA

---

La mayor parte de las aplicaciones en las que resulta de interés conocer estos campos de viento requiere de una planificación previa, lo que implica poder conocer con anterioridad el viento que existirá en un cierto momento futuro. Es aquí donde adquieren su importancia los modelos de simulación numérica que permiten el estudio de dichas condiciones. Los modelos de mesoescala y microescala, aunque comparten un corazón común basado en las ecuaciones que rigen el comportamiento de los fluidos, ofrecen grandes diferencias entre sí, de tal forma que tendrán que ser muchas las configuraciones y herramientas que se deberán analizar para permitir un funcionamiento acoplado entre ellos.

Cualquier simulación de fluidos requiere establecer cuidadosamente toda una serie de parámetros, entre los cuales destacan los relativos a la geometría y discretización del espacio, las condiciones de contorno aplicadas a las variables o las características del modelo numérico empleado para la resolución del problema. Todos estos elementos son analizados a continuación para cada uno de los dos modelos empleados, de forma independiente, así como para el procedimiento de asimilación de datos.

### 3.1. EL MODELO NUMÉRICO DE MESOESCALA

El programa meteorológico empleado en el presente trabajo es el WRF, con el modelo numérico ARW (Advanced Research WRF) versión 3.1. Las razones que han motivado tal elección son su demostrada fiabilidad y precisión, su extendido uso en el ámbito académico y científico y su acceso abierto y gratuito. Este modelo ha sido desarrollado como una colaboración entre diversos centros de investigación e instituciones: National Center for Atmospheric Research's (NCAR), National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory (NRL), University of Oklahoma y la Federal Aviation Administration (FAA).

Cuenta con diversos módulos de pre-procesado, procesado y post-procesado, esto le confiere una gran flexibilidad y capacidad, destacando por su interés para este trabajo:

- Capacidad de asimilación de datos meteorológicos en el dominio simulado<sup>1</sup>: permite mejorar los resultados del modelo mediante la incorporación de medidas tomadas sobre el terreno. Cuanto mayor sea la cantidad de datos proporcionada mejor será el resultado, es por ello que sistemas como el propuesto en el apartado 4 de este trabajo, capaz de proporcionar el perfil de vientos completo, resultan de una gran utilidad.
- Diferentes técnicas de modelado de la capa límite atmosférica: permite elegir el modelo que proporcione aquellos parámetros que resultan necesarios o de interés para realizar la integración con el modelo CFD de microescala, como puede ser la energía cinética de la turbulencia.

Otra de las capacidades más útiles del modelo ARW es la capacidad que tiene de simular dominios anidados, de tal forma que a partir de un dominio grande y de baja resolución pueden crearse dominios más pequeños de alta resolución en aquellas zonas que resulten de interés.

El conjunto de módulos que generan las predicciones se ejecuta secuencialmente y de forma automatizada gracias a un *script* que controla la secuencia de módulos, carpetas y archivos que intervienen a lo largo de simulación.

El flujo del programa es el que sigue:

- Geogrid: Este módulo tiene el objetivo de definir los dominios de la simulación y realizar la malla correspondiente.
- Ungrib: Es el encargado de desempaquetar los datos meteorológicos en formato GRIB, que contienen la información sobre el estado general de la atmósfera y serán utilizados inicialmente sobre la malla creada en el módulo anterior, a un formato intermedio apto para el resto de módulos
- Metgrid: Este módulo se encarga de interpolar horizontalmente sobre la malla producida por *geogrid* los datos meteorológicos producidos por *ungrib*.

---

<sup>1</sup> Capacidad heredada del modelo MM5, descripción del método en (Barker, et al. 2004)



- Real: El objetivo principal del módulo es el de leer las condiciones de control y generar los archivos que contienen las condiciones iniciales de la simulación. Leyendo la información meteorológica incluida en los archivos que le son proporcionados como input por *metgrid*, interpola verticalmente, y crea los archivos que contienen la información sobre las condiciones laterales del dominio mayor (si lo hubiese).
- WRF-Var: Realiza la asimilación de datos, introduciendo las observaciones mediante técnicas variacionales.
- Wrf: Propaga y produce las predicciones usando las ecuaciones de mecánica de fluidos en el modelado meteorológico.

Se procede a detallar, en los sucesivos apartados, los métodos y configuraciones elegidos para algunos de los aspectos más determinantes en lo que se refiere a la realización de las simulaciones numéricas de mesoescala

### 3.1.1. DEFINICIÓN DE LOS DOMINIOS

Como ya se ha indicado en apartados anteriores, una de las mayores ventajas del modelo WRF es que permite trabajar con modelos anidados, de tal forma que puede generarse un dominio de gran tamaño y baja resolución para captar las influencias meteorológicas de gran escala sin perjudicar por ello la resolución y precisión en la zona de interés, donde puede crearse un dominio pequeño y de alta resolución.

En este caso, los dominios elegidos son:

- ✚ Dominio 01: Dominio grande que cubre la mayor parte de la península Ibérica. Con unas dimensiones de 864 km de ancho por 558 km de largo y un tamaño de celda de 4.5 km de lado.
- ✚ Dominio 02: Dominio pequeño centrado en el Aeropuerto de León. Con unas dimensiones de 150 km de ancho por 150 km de largo y un tamaño de celda de 1.5 km de lado.

La relación de tamaños de celda del dominio general al anidado es de 3:1. La razón de que se use esta relación de tamaños de celda es que, si este número es impar, se puede conseguir que coincidan entre sí los puntos de las celdas de los dominios anidados. El ratio 3:1 es el que está siendo empleado por haber sido ampliamente estudiado y recomendado, ya que ofrece diversas ventajas, tanto en lo que se refiere a los aspectos computacionales como de modelado de los fenómenos físicos (Dave and Pyle 2012). Esta misma relación es utilizada, además, para los time-steps de cada dominio.

Por otra parte, la resolución geográfica del dominio, utilizada para la base de datos topográfica, es de 30 segundos de arco. Esta es una resolución alta, en concordancia con el pequeño tamaño de celda del dominio y la elevada precisión buscada.

Otro aspecto a tener en cuenta es el sistema proyectivo en el que está basado el mapa geográfico sobre el que se calculan los dominios de simulación. La proyección empleada es

Lambert cónica conforme, por adecuarse mejor a la situación geográfica de los dominios (latitudes medias).

Finalmente, en lo que se refiere a la discretización vertical de los 20 km de altura del dominio, éste se divide en 38 niveles verticales repartidos de forma heterogénea, empleando una mayor densidad de niveles en las inmediaciones del terreno, donde los gradientes de las variables con respecto a la altura son mucho mayores, a semejanza de lo que puede verse en otros trabajos como (Borge, et al. 2008).

### 3.1.2. ASIMILACIÓN DE OBSERVACIONES EN EL DOMINIO

La asimilación de datos procedentes de observaciones en la elaboración de predicciones numéricas puede realizarse en diferentes momentos y mediante distintas técnicas. En función del momento en que se realizan cabe distinguir entre aquellas que se emplean para mejorar el estado inicial del modelo y las que se emplean durante la propagación de dicho estado.

#### 3.1.2.1. Asimilación de datos en cuatro dimensiones

La asimilación de datos en cuatro dimensiones (más conocido por sus siglas del inglés FDDA, *Four-Dimensional Data Assimilation*) permite, mediante la técnica conocida como *nudging* o relajación Newtoniana, que el estado del modelo se aproxime progresivamente hacia las observaciones de las que se dispone mediante el uso de un término añadido a las ecuaciones basado en las diferencias entre el estado observado y el modelo. Su objetivo es conseguir la mayor similitud posible entre el estado inicial empleado para realizar las predicciones y la realidad y es una técnica ampliamente experimentada que se ha revelado como fiable y eficaz (Stauffer, Seaman and Binkowski 1991).

Los términos correctores que se añaden a las ecuaciones para emplear el método nudging adoptan habitualmente la forma  $G_{(i,j,k)}(U_0 - U)$ , donde  $G$  es el coeficiente del nudging que determina en qué medida se forzará la convergencia de los valores de la simulación a las observaciones, las coordenadas  $i, j, k$  definen el punto del espacio en el que se aplica el termino corrector, mientras que  $U$  indica el valor de la velocidad (o cualquier otra variable a la que se aplique el método) calculado por el modelo para ese punto y  $U_0$  el valor de la observación. No existen demostraciones teóricas para fijar el valor óptimo del término  $G$ , ahora bien se han propuesto algunas definiciones del mismo que han probado ser razonables (Yamada and Koike 2010), así el termino  $G$  puede hacerse proporcional a un factor de peso conocido como  $\alpha$  y al incremento de tiempo  $\Delta t$  empleado en la simulación, de tal forma que se consigue la expresión:

$$G = \frac{\alpha}{\Delta t} \tag{38}$$

Valores razonable para  $\alpha$  son aquellos que se encuentran en el rango comprendido entre el 0.1 y 0.01.

El modelo numérico WRF permite la utilización del nudging en dos modos diferentes:

- *Analysis nudging*: cada punto de la celda se aproxima a un valor que está interpolado de las observaciones. Las aproximaciones pueden ser calculadas con diferente frecuencia. Se recomienda su uso en los dominios de mayor tamaño de celda donde las observaciones pueden ser mejores que lo producido por el modelo.
- *Observation nudging*: cada punto de la celda se aproxima usando una media ponderada de las diferencias a las observaciones dentro de un radio de influencia y de una ventana de tiempo. Puede ser utilizado para asimilar observaciones sinópticas o las proporcionadas con mucha frecuencia. Las aproximaciones se calculan con frecuencias concreta según cada variable. Su uso es más específico de celdas de tamaño pequeño.

Con estas consideraciones, el método que ha sido implementado es el Observation Nudging. Algunas de las posibilidades y técnicas que emplea son: asimilar datos tanto sinópticos como asinópticos, realizar controles de calidad para descartar las observaciones que no sean adecuadas, las observaciones de superficie se adaptan inicialmente al primer nivel del modelo y, luego, las variables ajustadas al nivel más bajo son utilizadas para corregir el modelo con menor peso conforme se acercan al final de la ABL, la orografía del terreno hace que se corrija la influencia de las observaciones, etc. (Liu, Warner, et al. 2011).

### 3.1.2.2. Análisis variacional de datos

El sistema de asimilación de datos basado en análisis variacional combina toda la información disponible del estado atmosférico en un cierto margen de tiempo con el objetivo de producir una estimación de las condiciones en un momento de análisis especificado. Las fuentes que proporcionan la información necesaria para el análisis son las observaciones, las predicciones previas, los errores de cada uno de ellos y las leyes físicas.

Es una técnica altamente compleja en la cual la asimilación de datos se realiza en ciclos de análisis, en los que las observaciones de momentos pasados y actuales se combinan con las variables de un modelo numérico de predicción meteorológica para producir un análisis que mejora la estimación de la predicción. En la asimilación variacional se refinan las estimaciones del estado atmosférico mediante la minimización iterativa de una función de coste predefinida, produciendo una estimación adecuada del estado atmosférico verdadero en el momento del análisis. El sistema de asimilación variacional es en tres dimensiones y se denominada 3D-Var (Zhang, et al. 2010).

### 3.1.3. INICIALIZACIÓN DE LAS SIMULACIONES

La inicialización de las simulaciones meteorológicas es una cuestión no trivial que debe ser realizada cuidadosamente. Mediante dicho proceso se lleva a cabo la modificación de las variables en el estado inicial de tal forma que cuando se produce la integración de las ecuaciones para dicho estado se evite la aparición de inestabilidades en los términos relativos a la conservación de la masa y la cantidad de movimiento (Daley 1991).

Fundamentalmente son dos las técnicas que existen para la inicialización de las simulaciones: Nonlinear Normal Mode Initialization (NNMI) propuesto en (Machenhauer 1977) y Digital Filter Initialization (DFI) planteado por primera vez en (Lynch y Huang 1992). El DFI, con sus diversas variantes que veremos a continuación, ha venido a convertirse en el estándar de trabajo en los modelos numéricos de predicción gracias a su relativa sencillez en la implementación y los buenos resultados conseguidos, como puede comprobarse en (Peckham, et al. 2008).

Existen tres variantes DFI:

- Digital Filter Launch (DFL), propuesto en (Lynch and Huang 1994). El método se basa en calcular el estado inicial en base a un filtrado recursivo aplicado sobre propagaciones realizadas con los datos previos. De esta forma puede realizarse posteriormente la integración de las ecuaciones sobre los nuevos valores iniciales obtenidos mediante el proceso de filtrado, consiguiendo por tanto una predicción libre de ruido.
- Diabatic DFI (DDFI), propuesto en (Huang and Lynch 1993). En este caso el procedimiento seguido se basa en una integración adiabática hacia atrás de las condiciones iniciales procesada mediante un filtro recursivo, seguida de una integración diabática hacia delante del doble de duración, de tal forma que se consiguen tendencias para las variables centradas en el tiempo de análisis. Estos resultados son introducidos en el filtro, proporcionando así los valores para el campo inicial.
- Twice-DFI (TDFI), propuesto en (Lynch, Giard and Ivanovici 1997). Es una modificación del modelo anterior, basada en la aplicación de un filtrado tanto a la integración adiabática hacia atrás como a la integración diabática hacia adelante.

Las diferencias entre los distintos modos de funcionamiento del DFI aparecen resumidas en los siguientes esquemas:

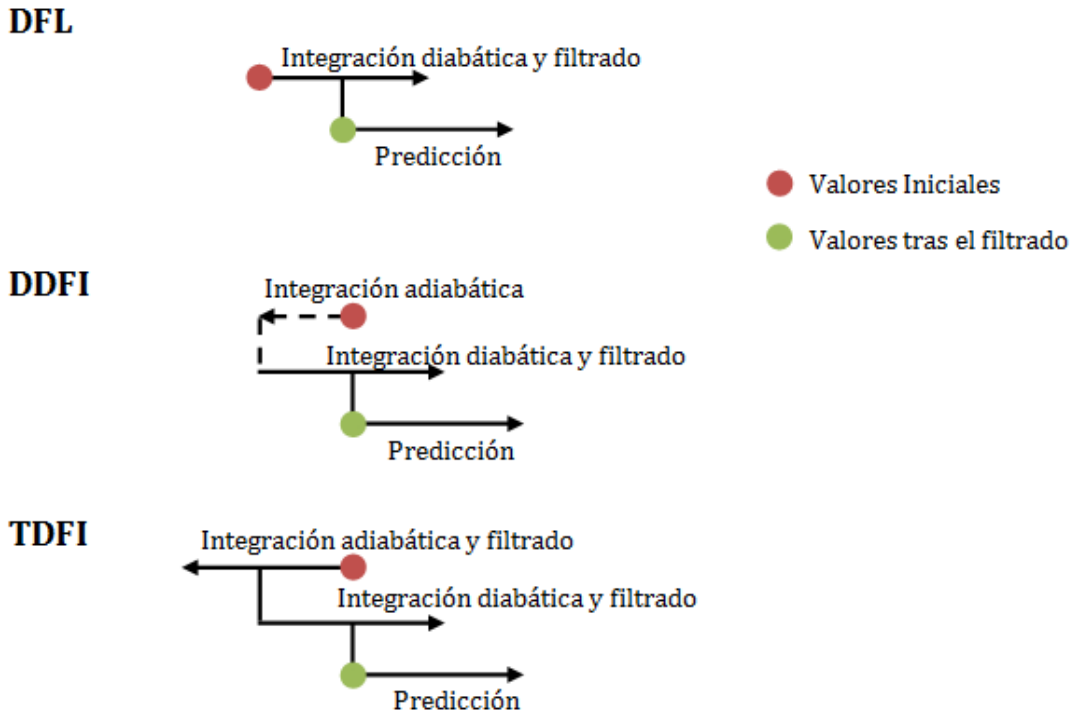


FIGURE 14: DIFERENTES MODOS DE FILTRADO PARA LA INICIALIZACIÓN DE LAS PREDICIONES EN EL WRF

### 3.1.4. CONFIGURACIÓN DEL MODELO FÍSICO Y DINÁMICO

Todo modelo numérico de meteorología se basa en métodos matemáticos que tratan de reproducir el comportamiento real del sistema mediante una serie de aproximaciones y simplificaciones. Existen multitud de fenómenos físicos que deben recrearse, para cada uno de los cuales pueden emplearse distintos modelos, el WRF permite que mediante los apartados *physics* y *dynamics* del archivo *namelist.input* el usuario pueda seleccionar los modelos a emplear. Se detalla a continuación la configuración empleada para el presente trabajo, que ha seguido las recomendaciones de la guía de usuario así como las ofrecidas por la Universidad de Washington para una simulación de estas características (University of Washington 2012):

*Physics:*

Modela	Descripción de la opción
Microfísica	Esquema Thompson para granizo que incluye seis clases de especies para la humedad.
Física de la radiación de onda larga	Modelo de transferencia rápida de radiación. Preciso esquema basado en la búsqueda en tablas y que tiene en cuenta múltiples bandas, gases y especies microfísicas.
Física de la radiación de onda corta	Esquema Dudhia: Integración simple que permite de forma eficiente captar la absorción y dispersión con cielos nubosos o despejados.
Minutos entre llamadas a física	Recomendado 1 minuto por km de ancho de celda.

### 3. Integración de modelos numéricos de mesoescala y microescala

---

de radiación

Modelo para la capa en la superficie	Recomendado el modelo 5 para el modelo MYNN de capa límite.
Modelo para la superficie del terreno	Modelo Noah para el terreno: Esquema unificado con temperatura y humedad del terreno en 4 capas, fracción cubierta de nieve y suelo congelado.
Modelo de capa límite atmosférica	Mellor-Yamada Nakanishi y Niino (MYNN): Modelo de capa límite basado en el cálculo explícito de la turbulencia.
Minutos entre llamadas al modelo de capa límite	Llamada al modelo en cada una de las iteraciones.
Efectos gravitacionales sobre gotas de niebla y nubes	Desactivado
Modelo de nubes	Desactivado
Minutos entre llamadas al modelo de nubes	
Número de celdas sobre los cuales se extiende el hundimiento	Recomendado para celdas con anchura inferior a los 5 km.
Flujos de calor y humedad desde la superficie	Activado
Efecto de la capa de nieve	Activado
Efecto de las nubes en la radiación	Activado
Origen de los datos sobre uso del terreno y tipo de suelo	Origen WPS/geogrid.
Parámetro para la dispersión	Valor por defecto, equivalente a $1e^{-5} \text{ m}^2/\text{kg}$ .
Número de capas del terreno	4 son las capas correspondientes al modelo Noah
Física de las zonas urbanas	Activa el modelo de cubierta urbana (valido solo con modelo Noah)
Corrección a $Q_v$	No realiza ninguna acción
Umbral para la humedad	
Calor latente en los esquemas de microfísica	Normal
Umbral para el hielo marino	Valor por defecto
Uso de SST cambiante con el tiempo durante la simulación	Desactivado
Uso de mapas de albedo mensuales	Empleará los valores presentes en las tablas
Origen datos Leaf Area Index	A partir de tablas
Valor de reinicio acumulación de agua	Inactivo
Valor de reinicio para acumulación de energía	Inactivo
Actualizar temperatura del suelo	Desactivado

### 3. Integración de modelos numéricos de mesoescala y microescala

---

profundo	
Días para el cálculo de la temperatura del suelo profundo	Valor por defecto
Calcular <i>Sea Surface Temperature</i> en la superficie	Desactivado
Efectos de pendiente en ra_sw_physics	Activados
Efectos de sombra del punto vecino en ra_sw_physics	Activados
Activar modelo simple de mezcla en capa oceánica	Desactivado
Tratamiento del hielo marino como campo fraccional	Desactivado

---

#### *Dynamics:*

---

<b>Modela</b>	<b>Descripción de la opción</b>
Efecto de onda gravitatoria	Desactivado
Esquema de integración para tiempos	Runge-Kutta de 3 <sup>er</sup> orden (recomendado)
Amortiguamiento de la velocidad vertical	Activado
Opciones de turbulencia y mezclado	Evalúa los términos difusivos de segundo orden en superficies coordenadas.
Coefficiente turbulento	Formulación de primer orden con modelo horizontal de Smagorinsky. El término K para la difusión horizontal se determina a partir de la deformación horizontal. Asume que la difusión vertical es obtenida por el esquema de la ABL
Difusión numérica de sexto orden	Desactivada
Amortiguamiento nivel superior	Desactivado
Solver modo no hidrostático	Activado
Isotropía coeficientes de difusión	Coefficientes de difusión anisótropos.
Orden de los momentos advectivos horizontales	Quinto orden
Orden de los momentos advectivos verticales	Tercer orden
Orden de la advección horizontal escalar	Quinto orden
Orden de la advección vertical escalar	Tercer orden
4 dividido entre el número de incrementos sonoros (sound steps) por cada incremento de tiempo	Se fija automáticamente. En caso de emplear un incremento de tiempo muy superior a 6 veces el ancho de celda se debe incrementar su valor de forma proporcional

---

De entre todos estos parámetros cabe destacar uno especialmente importante para la finalidad de este trabajo, el modelo de capa límite planetaria (parámetro *bl\_pbl\_physics*). Se emplea un modelo de la capa límite basado en la TKE, ya que permite obtener los perfiles de turbulencia que se pasarán al CFD<sup>2</sup>. Esta técnica aparece recogida en varios trabajos como (Mochida, et al. 2005), (Baik, Park and Kim 2009) ó (Tewari, et al. 2010), donde el modelo MYJ es empleado en los dominios con menor resolución, dentro de los cuales se encuentran anidados dominios con mayor resolución en los que se emplea un modelo de turbulencia *k-ε*.

La necesidad de emplear un modelo de capa límite que proporcione de forma explícita el valor de la energía cinética de la turbulencia reduce las posibles opciones a cuatro modelos: MYJ, QNSE, MYNN y BouLac. Ensayos recogidos en la literatura muestran que, para las variables velocidad del viento, temperatura y energía cinética de la turbulencia (TKE), el esquema MYNN es que ofrece las menores desviaciones medias y el menor error cuadrático medio (Sánchez-Perrino, et al. 2011):

TABLE 2: ERRORES DE LOS PARÁMETROS SIMULADOS FRENTE A LAS OBSERVACIONES REALIZADAS DURANTE UN PERIODO DE 14 DÍAS (SÁNCHEZ-PERRINO, ET AL. 2011)

	Temperatura		Velocidad Viento		Energía Cinética Turbulenta	
	BIAS	RMS	BIAS	RMS	BIAS	RMS
<b>MYJ</b>	-0.70	2.07	0.52	1.60	-1.16	3.38
<b>MYNN</b>	-0.57	1.81	0.06	1.34	0.19	2.55
<b>QNSE</b>	-0.87	2.17	0.28	1.47	-1.07	3.30

Otras configuraciones relevantes para la realización de simulaciones con el modelo de mesoescala son elegidos de acuerdo a las indicaciones proporcionadas en (Borge, et al. 2008) –donde realizan un exhaustivo análisis de los resultados que ofrecen las diferentes configuraciones– y la guía de usuario:

- Microfísica: El modelo Thompson, adecuado para simulaciones de alta resolución.
- Modelo terreno-superficie: Modelo Noah para el terreno.
- Esquema de radiación onda corta: Esquema Dudhia
- Esquema de radiación onda larga: Esquema GFDL.

### 3.1.5. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DE MESOESCALA

A modo ilustrativo, durante el verano de 2010 se ejecutó una campaña de validación en el aeropuerto de Santander (Salguero y Gonzalo 2011), comparando las medidas realizadas por globos de sondeo y los modelos oficiales españoles (HIRLAM), ofrecidos

<sup>2</sup> Para más información sobre este procedimiento consultar el apartado 3.3



comercialmente por la Agencia Estatal de Meteorología, con los resultados de WRF ejecutado localmente en el laboratorio.

Las figuras Figure 15 y Figure 16 muestran que la precisión de WRF es buena, mejorando en esta campaña incluso las predicciones de los modelos oficiales, que poseen información de las medidas locales. Esta mejora puede justificarse por el hecho de que el modelo WRF, al estar enfocado a un dominio menor, puede ejecutarse con mayor resolución y un paso de simulación más pequeño que el requerido cuando se han de predecir las condiciones atmosféricas en un dominio extenso.

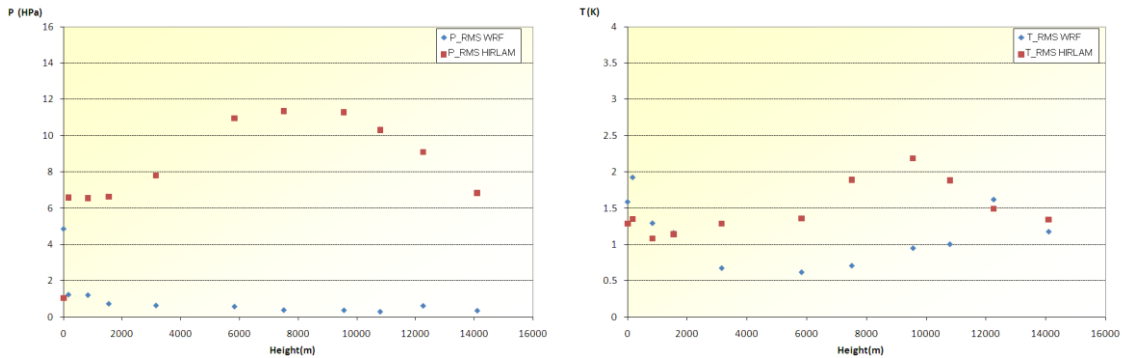


FIGURE 15: ERROR EN PRESIONES Y TEMPERATURAS DE LOS MODELOS WRF Y HIRLAM RESPECTO A LAS MEDIDAS TOMADAS POR GLOBO DE SONDEO

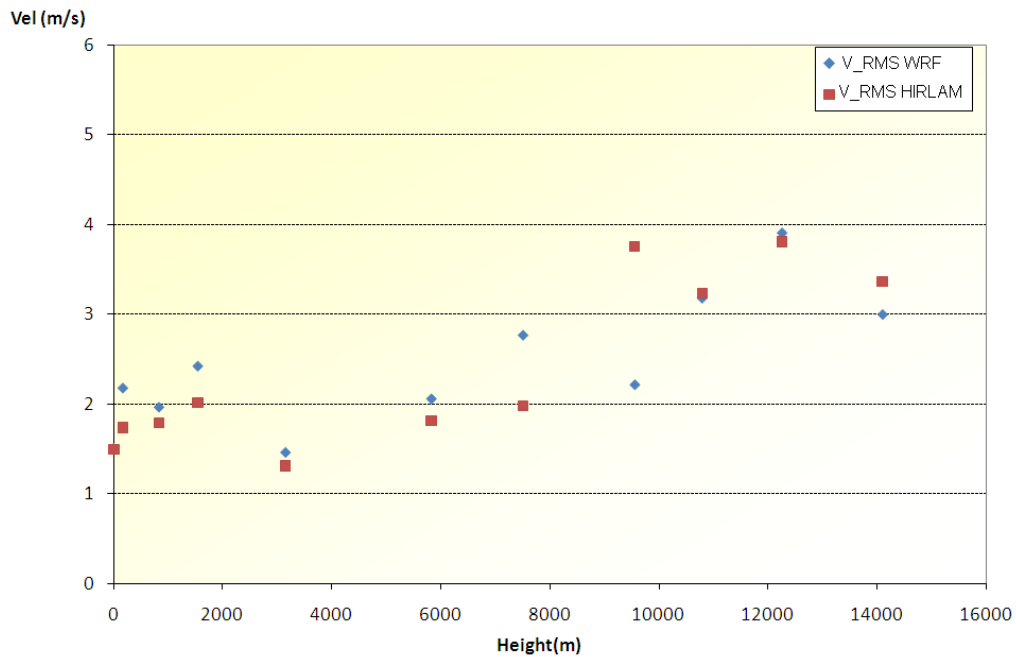


FIGURE 16: ERROR EN VELOCIDAD DE VIENTO DE LOS MODELOS WRF Y HIRLAM RESPECTO A LAS MEDIDAS TOMADAS POR GLOBO DE SONDEO

### 3.2. EL MODELO CFD DE MICROESCALA

Actualmente existe en el mercado una gran cantidad de software comercial destinado a la realización de simulaciones de mecánica de fluidos. Muchos de estos programas requieren el desembolso de grandes cantidades de dinero en forma de licencias para poder utilizarlos legalmente, es por ello que desde hace algunos años han surgido herramientas alternativas, basadas en códigos abiertos, que han adquirido un gran auge, especialmente entre aquellos grupos de usuarios cuyos presupuestos son limitados y no permiten los desembolsos que exigen los programas de software propietario.

En este contexto, para la realización de la presente tesis doctoral, se ha optado por emplear el paquete de código OpenFOAM® (OpenCFD Limited 2011) atendiendo a las siguientes razones:

- Por ser una herramienta de código abierto es susceptible de cualquier tipo de cambio o modificación.
- Se encuentra disponible en el Centro de Supercomputación de Castilla y León para la realización de simulaciones de gran tamaño.
- De entre todos los programas CFD de código abierto es con diferencia el más completo y avanzado.
- La utilización de esta herramienta está libre de cualquier tipo de carga económica.

Entre las principales características y prestaciones de OpenFOAM cabe señalar:

- Es un código desarrollado por la compañía OpenCFD Ltd., con sede en Londres.
- Se presenta en forma de *utilities* y herramientas empleadas en cada una de las etapas de resolución de un problema de CFD.
- Permite realizar tareas en paralelo, no sólo la resolución de las ecuaciones, sino también la creación de la malla.
- Es capaz de resolver no sólo problemas de movimiento de fluidos sino que también puede aplicarse a la interacción entre fluidos y estructuras, problemas complejos de transferencia de calor y masa, motores de combustión interna, reacciones químicas, etc.

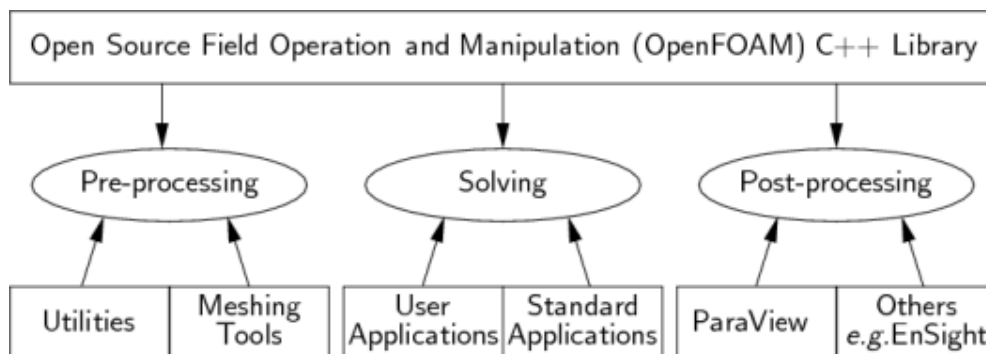


FIGURE 17: OPENFOAM GENERAL STRUCTURE (OPENCDF LIMITED 2011)

OpenFOAM, en conjunto, resulta una herramienta genérica para la resolución de problemas de mecánica de fluidos computacional, disponiendo de diversas herramientas para la resolución de cada tipo de problema concreto, cada una de ellas se conoce con el nombre de *solver* y recoge la versión de las ecuaciones de Navier-Stokes empleada para resolver el problema así como el algoritmo empleado. Adicionalmente se deben especificar también los esquemas numéricos empleados, condiciones de contorno, etc. Todo ello se especificará con detalle en los siguientes apartados.

### 3.2.1. MODELO NUMÉRICO

La elección del modelo numérico, o *solver*, más adecuado viene determinada por las características del problema a resolver, en este caso el movimiento del aire en las capas bajas de la atmósfera, por lo cual se empleará un *solver* con las siguientes características:

- Estacionario, dadas unas condiciones fijas de entrada al dominio se trata de encontrar una solución estable a las mismas.
- Flujo incompresible, la velocidad del viento es siempre lo bastante baja como para poder considerarlo un fluido incompresible. Además inicialmente se desprecian los efectos térmicos debidos a la radiación solar y a la interacción aire-terreno.
- Flujo viscoso y turbulento, se debe elegir el modelo de turbulencia adecuado, según el apartado 2.1.2.2 el más acertado para la ABL de entre los disponibles es el modelo  $k-\varepsilon$ . Siendo adaptado para conseguir unas prestaciones óptimas en el modelado de este tipo de flujos.

Según estos criterios, el *solver* más adecuado de entre aquellos proporcionados por OpenFOAM es el conocido como *simpleFOAM*, en dicho *solver* se aplica la siguiente versión simplificada de las ecuaciones de Navier-Stokes planteadas en (6), (7) y (8). Puesto que se trata de modelar un flujo turbulento mediante un modelo RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations) las ecuaciones deben ser adaptadas para incluir los términos indicadores de los valores medios de variación de la magnitud, una vez realizado dicho proceso las ecuaciones resultan (teniendo en cuenta todas las simplificaciones anteriormente indicadas) en (Jasak 1996):

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (39)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{V}\mathbf{V}') = -\nabla p + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\overline{\mathbf{V}'\mathbf{V}'}') \quad (40)$$

El término  $\mathbf{V}'\mathbf{V}'$  se conoce con el nombre de tensor de esfuerzos de Reynolds, constituye una nueva incógnita que aparece en el sistema, es por ello que se requieren nuevas ecuaciones de modelado. El método más habitual relaciona el tensor de esfuerzos de Reynolds con el gradiente de la velocidad media, aproximación conocida como de Boussinesq (Boussinesq 1877) y que propone una relación lineal según la fórmula:

$$\overline{\mathbf{V}'\mathbf{V}'} = \nu_t (\nabla U + (\nabla U)^T) + \frac{2}{3} k \mathbf{I} \quad (41)$$

donde  $\mathbf{I}$  es el tensor unitario y  $k$  viene dada por

$$k = \frac{1}{2} \overline{\mathbf{V}'\mathbf{V}'} \quad (42)$$

Llegados a este punto, la viscosidad cinemática de la turbulencia  $\nu_t$  puede ser evaluada de múltiples formas, dependiendo del modelo de turbulencia elegido. Para el modelo de turbulencia *k-epsilon* seleccionado,  $\nu_t$  se resuelve en función de las variables  $k$  y  $\varepsilon$ , según las expresiones ya indicadas en capítulos anteriores y aquí repetidas:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad (43)$$

$$\varepsilon = \nu \overline{\mathbf{V}'\mathbf{V}'} : \nabla \mathbf{V}' \quad (44)$$

a su vez los valores de ambas variables se obtienen según sus respectivas ecuaciones de transporte planteadas en (13) y (14).

Como indica su propio nombre, el algoritmo de resolución del sistema de ecuaciones planteado es el SIMPLE, propuesto por (Patankar and Spalding 1972) y muy extendido desde entonces, el proceso de cálculo de la solución en OpenFOAM siguiendo este algoritmo es el siguiente:

1. Establecimiento de las condiciones de contorno.
2. Resolución de la ecuación discretizada de conservación de la cantidad de movimiento para calcular un campo de velocidades intermedio.
3. Cálculo del flujo de masas en las caras de las celdas.
4. Resolución de la ecuación de la presión y aplicación de los factores de sobre-relajación.
5. Corrección del flujo másico en las caras de las celdas.
6. Corrección de las velocidades en base al nuevo campo de presiones.
7. Cálculo del resto de variables del problema ( $\varepsilon, k, \nu_t$ )
8. Actualización de las condiciones de contorno.
9. Repetir el proceso hasta alcanzar el criterio de convergencia.

Los pasos 4 y 5 pueden repetirse varias veces por iteración del algoritmo para corregir los efectos de no ortogonalidad de la malla.

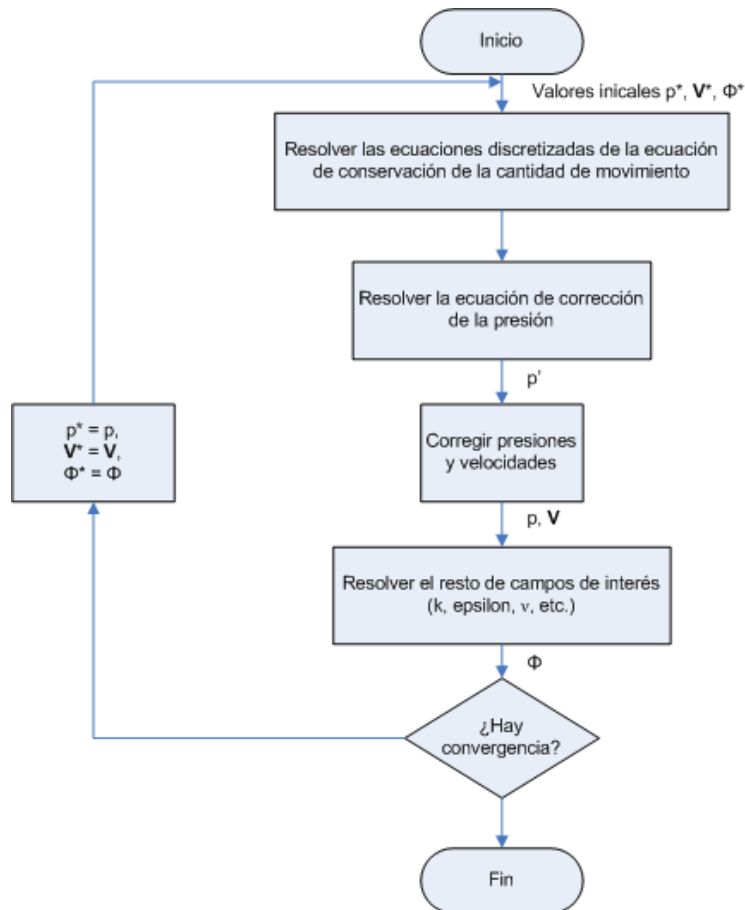


FIGURE 18: ALGORITMO DE RESOLUCIÓN SIMPLE

Para poder resolver las ecuaciones, estas deben aplicarse ya discretizadas sobre el volumen de control, también discretizado en regiones finitas llamadas celdas. La forma en que esto se realiza viene determinada por los esquemas numéricos. Una explicación detallada de los modelos existentes y sus características se puede encontrar en (Versteeg and Malalasekera 2007), aquí únicamente cabe reseñar los empleados para cada uno de los operadores matemáticos que aparecen en las ecuaciones:

- Tiempo:
  - steadyState
- Gradientes:
  - Gauss linear
- Divergencias:
  - Gauss upwind
- Laplacianos:
  - Gauss linear limited 0.333
- Interpolaciones:
  - Linear

Una vez planteados los sistemas de ecuaciones sobre los nodos y caras de la malla, se debe proceder a su resolución. OpenFOAM permite elegir el método de resolución empleado para cada una de las variables, indicándose aquí los empleados para resolver este caso:

- Presión:
  - GAMG: Geometric agglomerated algebraic multigrid solver
- Velocidad:
  - smoothSolver: Iterative solver using smoother for symmetric and asymmetric matrices which uses a run-time selected smoother
- Energía cinética de la turbulencia (k):
  - smoothSolver
- Disipación Viscosa ( $\epsilon$ ):
  - smoothSolver

Una explicación más detallada de los métodos de resolución de sistemas de ecuaciones presentes en OpenFOAM y sus características fundamentales puede encontrarse en (Behrens 2009).

#### 3.2.2. MODELO DE TURBULENCIA

El modelo de turbulencia *k-Epsilon* es el empleado para una correcta simulación de la Capa Límite Terrestre, las ecuaciones del modelo fueron expuestas detalladamente en el apartado 2.1.2.2, así como las adaptaciones que se deben tener en cuenta para ajustar dicho modelo a las características del flujo en la ABL terrestre.

#### 3.2.3. CONDICIONES DE CONTORNO PARA LA VERIFICACIÓN DEL MODELO

Las condiciones de contorno aplicables al dominio computacional deben ser especificadas para poder resolver el flujo, además deben fijarse con extremo cuidado, puesto que la solución en todo el dominio depende de dichas condiciones. En el problema que nos atañe de simulación de la capa límite atmosférica (inicialmente sin datos procedentes de un modelo meteorológico de mesoescala) dichas condiciones de contorno serán las siguientes en cada una de las caras del dominio:

- Entrada:
  - Velocidad (U): *atmBoundaryLayerInletVelocity*, función proporcionada por OpenFOAM, el perfil de velocidades a la entrada es calculado mediante la ley logarítmica siendo conocida: la rugosidad del terreno ( $z_0$ ), la velocidad de fricción ( $u_*$ ), la altura de referencia ( $h_{ref}$ ) y el valor de la constante de Von Karman (K). Función definida en (25).
  - Presión (p): *zeroGradient*, implica que el gradiente de la presión en la dirección perpendicular a la cara de entrada es cero.
  - Energía cinética de la turbulencia (k): *fixedValue*, valor de entrada fijo e igual para todas las celdas de entrada, calculado mediante la expresión (26).
  - Disipación viscosa ( $\epsilon$ ): *atmBoundaryLayerInletEpsilon*, función proporcionada por OpenFOAM, el valor de la disipación viscosa para cada una de las celdas de

entrada es función de la altitud de dicha celda respecto al terreno según la función (27).

- Viscosidad cinemática de la turbulencia ( $\nu_t$ ): *calculated*, el valor de la magnitud en las celdas de entrada es determinado internamente a partir de los valores de  $k$  y  $\varepsilon$  según la expresión correspondiente en el modelo k-epsilon (11)<sup>3</sup>.
- Salida:
  - Velocidad (U): *zeroGradient*, el gradiente para la velocidad en el sentido de avance del flujo es cero en la cara de salida.
  - Presión (p): *fixedValue*, valor fijo para la presión e igual a 0<sup>4</sup>.
  - Energía cinética de la turbulencia (k): *zeroGradient*, el gradiente para la variable en el sentido de avance del flujo es cero en la cara de salida.
  - Disipación viscosa ( $\varepsilon$ ): *zeroGradient*, el gradiente para la variable en el sentido de avance del flujo es cero en la cara de salida.
  - Viscosidad cinemática de la turbulencia ( $\nu_t$ ): *calculated*, el valor de la magnitud en las celdas de salida es determinado internamente a partir de los valores de  $k$  y  $\varepsilon$  según la expresión correspondiente en el modelo k-epsilon (11).
- Suelo/Terreno<sup>5</sup>:
  - Velocidad (U): *fixedValue*, puesto que se resuelve el problema con las ecuaciones de flujo viscoso la velocidad del fluido en la pared es conocida e igual a 0.
  - Presión (p): *zeroGradient*, el valor de la presión en esa celda es calculado de forma que satisfaga las ecuaciones del sistema.
  - Energía cinética de la turbulencia (k): *kqRWallFunction*, función de pared que aproxima el valor de la variable  $k$  en la pared.
  - Disipación viscosa ( $\varepsilon$ ): *epsilonWallFunction*, función de pared que aproxima el valor de la variable  $\varepsilon$  en la pared.
  - Viscosidad cinemática de la turbulencia ( $\nu_t$ ): *nutkRoughWallFunction*, función de pared que permite determinar el valor de la variable  $\nu_t$  cuando se trata de paredes con rugosidad<sup>6</sup>. Dicha rugosidad se define mediante los parámetros  $K_s$  y  $C_s$ .
- Caras laterales y superior:

---

<sup>3</sup> Cabe señalar que la formulación del modelo k-epsilon descrita en el apartado 2.1.2.2.1 emplea como variable la viscosidad dinámica, mientras que OpenFOAM emplea la viscosidad cinemática. El factor de conversión entre ambas magnitudes es la densidad del fluido.

<sup>4</sup> Se debe tener en cuenta que empleando un solver basado en el algoritmo SIMPLE el campo de presiones obtenido al resolver la ecuación de corrección de la presión no proporciona los valores de las presiones absolutas. Es por ello que se debe fijar un valor de presión absoluta como valor de referencia igual a cero en una de los nodos de salida o entrada (en este caso en un nodo de la cara de salida), de tal manera que una vez especificado el valor de referencia, el campo interno de presiones absolutas puede ser obtenido a partir de las relativas.

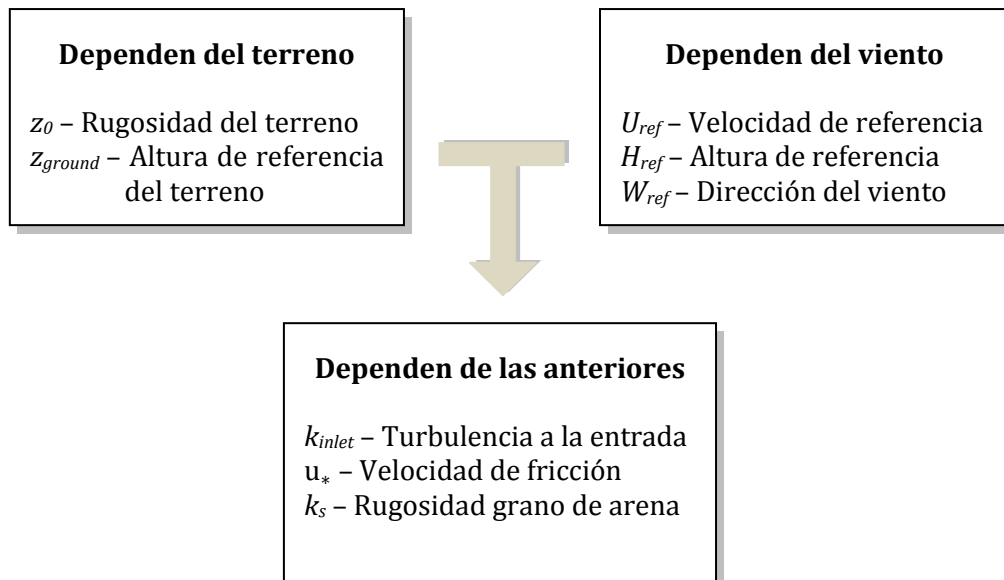
<sup>5</sup> Véase el Apéndice B para una explicación más detallada sobre la finalidad de las funciones de pared y su correcto modo de empleo en las simulaciones CFD.

<sup>6</sup> Como ya se indicaba en el capítulo de estado del arte, los pequeños obstáculos presentes en la superficie terrestre, tales como vegetación o montículos se modelan implícitamente mediante la rugosidad, no explícitamente.

- Para todas las variables se utiliza la condición *slip*, de esta forma cuando la variable se trata de un escalar la condición aplicada es *zeroGradient*; por contra, si la variable es un vector, para la componente en la dirección normal a la pared se aplica la condición *fixedValue* cero y para las componentes tangenciales la condición *zeroGradient* (OpenCFD Limited 2011).

### 3.2.4. VALIDACIÓN DEL MODELO PARA SIMULACIONES DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA

En este apartado se tratará de comprobar la adecuación del modelo CFD que se ha descrito anteriormente para la simulación de la capa límite atmosférica, para ello se realizarán diversas simulaciones de control sobre un dominio llano, se observarán las recomendaciones ya comentadas en las sección 2.1.2.2.4 y se determinará si es posible conseguir una capa límite estable. Aunque el objetivo de este trabajo no es simular el comportamiento de capas límites estables en el dominio simulado, sino comprobar precisamente su evolución y cambio frente a la orografía y estructuras humanas, esta comprobación resulta esencial, puesto que los cambios en el nivel de turbulencia y perfil de vientos que se generen durante las simulaciones de terreno real han de ser debidos únicamente a la orografía y las estructuras humanas, pero en ningún caso debe ser consecuencia de emplear técnicas de modelado inapropiado. Esto es lo que se tratará de comprobar consiguiendo una capa límite estable en el dominio simulado.



Para cada simulación deben configurarse las siguientes las variables resumidas en el esquema mostrado.



### 3.2.4.1. Configuración del caso de validación con modelo *k-epsilon* estándar

Igualmente, el dominio simulado es bidimensional, de 600 metros de alto por 2000 metros de largo, siendo la altura de la celda más cercana al suelo de 0.1 metros.

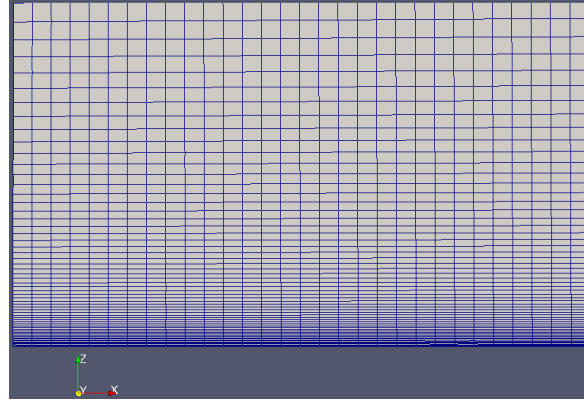


FIGURE 19: DOMINIO VACIO DISCRETIZADO PARA PRUEBAS DE VALIDACIÓN

Los valores empleados para las variables en el caso de control son los siguientes:

$$\begin{array}{llll}
 z_0 = 0.0015 \text{ m} & z_{\text{ground}} = 0 & U_{\text{ref}} = 10 \text{ m/s} & H_{\text{ref}} = 20 \text{ m} \\
 W_{\text{ref}} = (1 \ 0 \ 0) & k_{\text{inlet}} = 0.62 \text{ m}^2/\text{s}^2 & u_* = 0.432 \text{ m/s} & k_s = 0.045 \text{ m}
 \end{array}$$

Las características del terreno elegido, así como el mallado, se ha realizado teniendo en consideración lo comentado en el apartado 2.1.2.2.4, es decir, se ha elegido un terreno con una rugosidad aerodinámica baja, de tal forma que la rugosidad de grano de arena tenga una altura lo suficientemente baja como para permitir que la altura total de la primera celda sea del orden de los 10 cm. Se ha empleado la formulación estándar del modelo *k-epsilon* y de sus funciones de pared.

### 3.2.4.2. Resultados del caso de validación modelo *k-epsilon* estándar

En primer lugar se ha llevado a cabo una prueba para comprobar la condición de contorno más adecuada para la parte superior del dominio, se busca así una condición que permita reflejar el hecho de que en el exterior del dominio se mueve el aire arrastrando por fricción (mediante su viscosidad) el fluido que se encuentra en la zona superior del dominio, al mismo tiempo que permanece constante para la toda la longitud del dominio simulado. Para ello se establece un valor fijo para la velocidad en la cara superior, de valor igual al de la velocidad a dicha altura en el perfil de entrada. Los resultados son los siguientes:

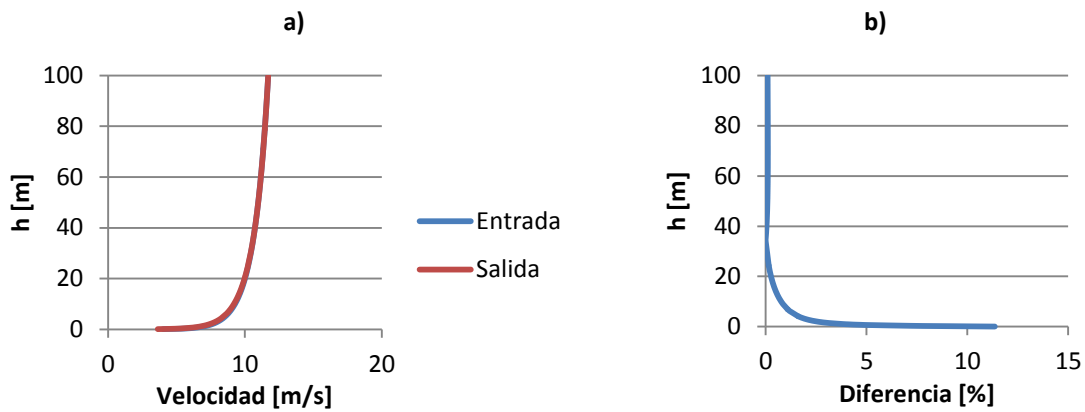


FIGURE 20: RESULTADOS PARA LA SIMULACIÓN CON VELOCIDAD FIJA EN LA PARTE SUPERIOR DEL DOMINIO. A) PERFILES DE VELOCIDAD A LA ENTRADA Y SALIDA, B) DIFERENCIA EN PORCENTAJE ENTRE AMBOS PERFILES

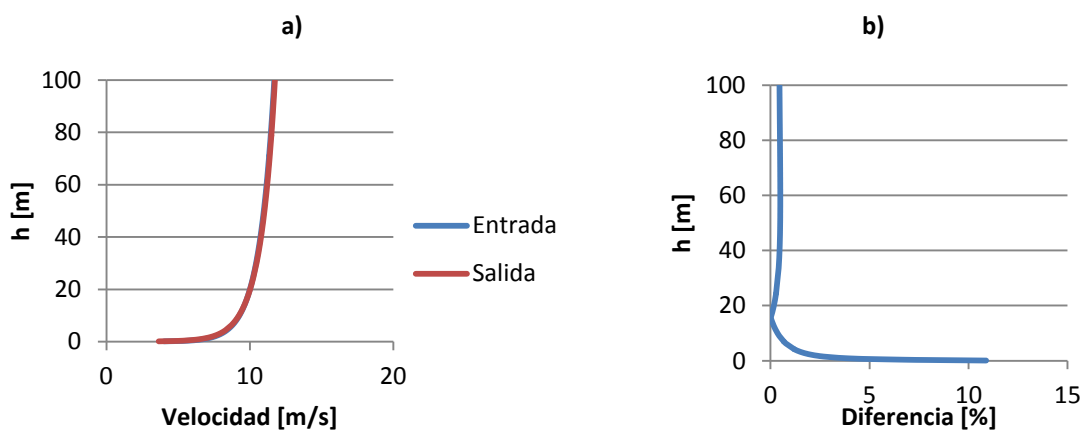


FIGURE 21: RESULTADOS PARA LA SIMULACIÓN SIN VELOCIDAD FIJA EN LA PARTE SUPERIOR DEL DOMINIO. A) PERFILES DE VELOCIDAD A LA ENTRADA Y SALIDA, B) DIFERENCIA EN PORCENTAJE ENTRE AMBOS PERFILES

Aunque la diferencia es muy pequeña, se aprecia una mayor semejanza entre los perfiles de entrada y salida en el caso de fijar una velocidad constante en la cara superior del dominio. En cualquier caso cualquiera de las aproximaciones es lo suficientemente buena.

Para llevar a cabo la validación del modelo se analiza el resultado de la simulación comprobando el valor a la entrada y la salida del volumen de control de las tres magnitudes de relevancia: la velocidad, la turbulencia y la disipación viscosa. Dichos valores aparecen a continuación reflejados en las siguientes gráficas:

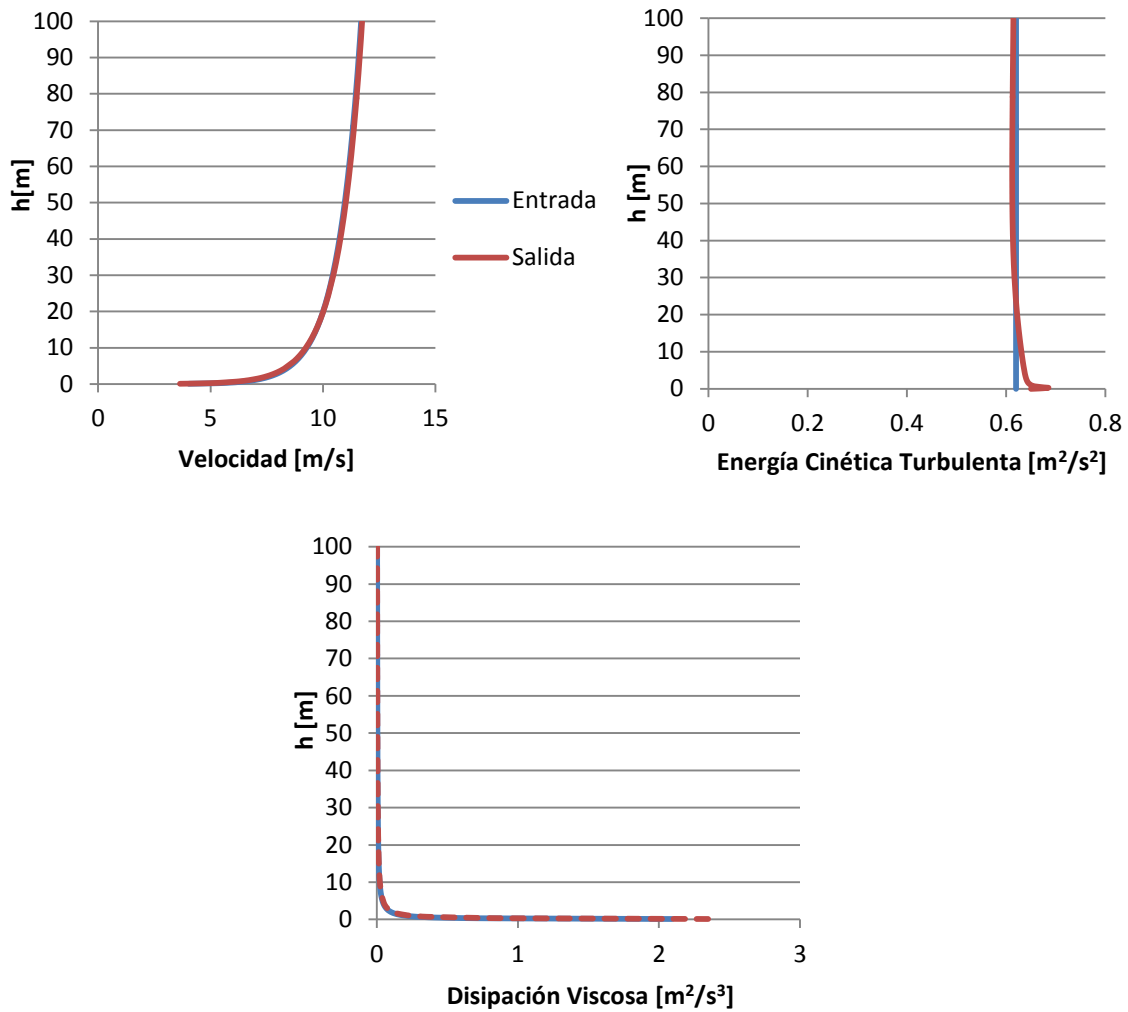


FIGURE 22: PERFILES DE LA VELOCIDAD, TURBULENCIA Y DISIPACIÓN VISCOSA A LA ENTRADA Y SALIDA DEL DOMINIO.

Como puede apreciarse los perfiles de entrada y salida son muy semejantes tanto para la velocidad como para la disipación viscosa, teniendo lugar las mayores diferencias en las gráficas de la energía cinética turbulenta. Estos errores ya han sido observados y ampliamente comentados en la bibliografía, valga como ejemplo (Blocken, Stathopoulos and Carmeliet 2007) o (Hargreaves and Wright 2007). Así, pese a haber seguido las recomendaciones indicadas en ambos trabajos (que no implican modificaciones en el código) se sigue produciendo un error en el cálculo de la energía cinética de la turbulencia en las inmediaciones de la pared. Esto cabe achacarlo al hecho de que, a pesar de utilizar una rugosidad baja<sup>7</sup> y una altura de la primera celda de 0.1 m, el valor del parámetro  $y^+$  es de 2000, excesivamente alto para el empleo de las funciones de pared estándar<sup>8</sup>. Aunque en este caso las desviaciones son relativamente pequeñas y el modelo ofrece una precisión importante, queda patente que seguir únicamente las recomendaciones propuestas por (Blocken, Stathopoulos and Carmeliet 2007) se revela insuficiente para conseguir una correspondencia exacta entre los perfiles de entrada y salida.

<sup>7</sup> Realmente demasiado baja para la mayor parte de los terrenos que pueden simularse.

<sup>8</sup> Para más información relativa al uso apropiado de las funciones de pared el lector puede remitirse al Apéndice B.

No obstante, a la vista de los resultados expuestos en el apartado anterior, puede considerarse que el modelo es lo suficientemente bueno: las diferencias en el perfil de velocidad entre la salida y la entrada al dominio es inferior al 3% a partir de alturas superiores a los 2 metros; el perfil de turbulencia consigue mantenerse estable a excepción de los 10 primeros metros del perfil, donde se observa un pico en la intensidad de la turbulencia comentado en el anterior apartado pero que no supone una pérdida de precisión importante para los estudios planteados en este trabajo.

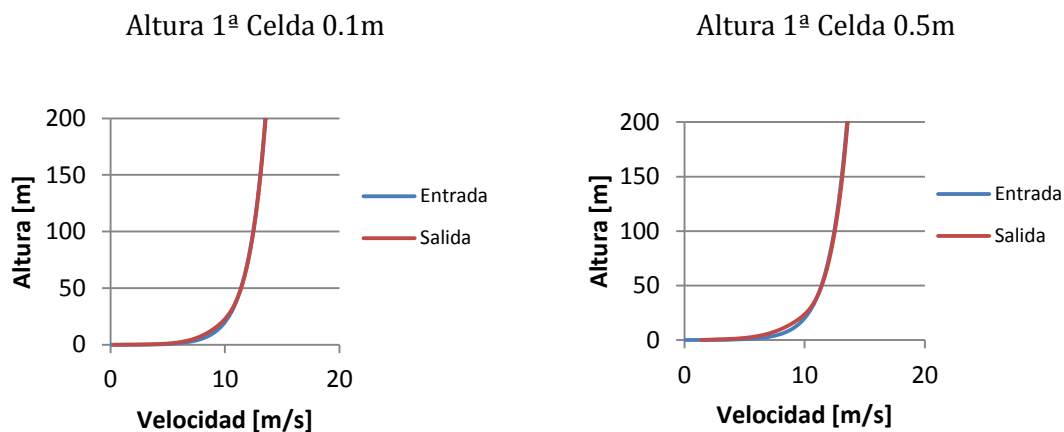
A continuación se realiza un nuevo ensayo en el que se recrea un terreno cuyo valor de rugosidad aerodinámica es el característico de un entorno aeroportuario, siendo este de 0.03 m (Wieringa 1992). Para fijar el valor de la rugosidad de grano de arena se empleará la expresión (30), ya que esa es la empleada en OpenFOAM para reproducir el efecto de la rugosidad de la pared en el flujo.

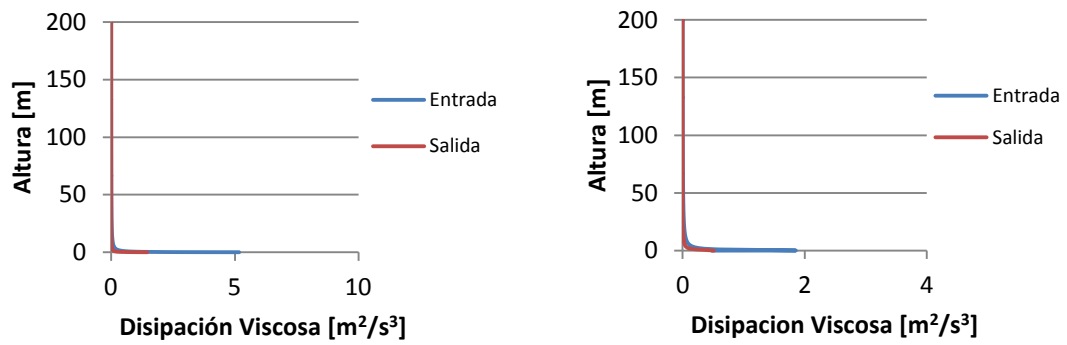
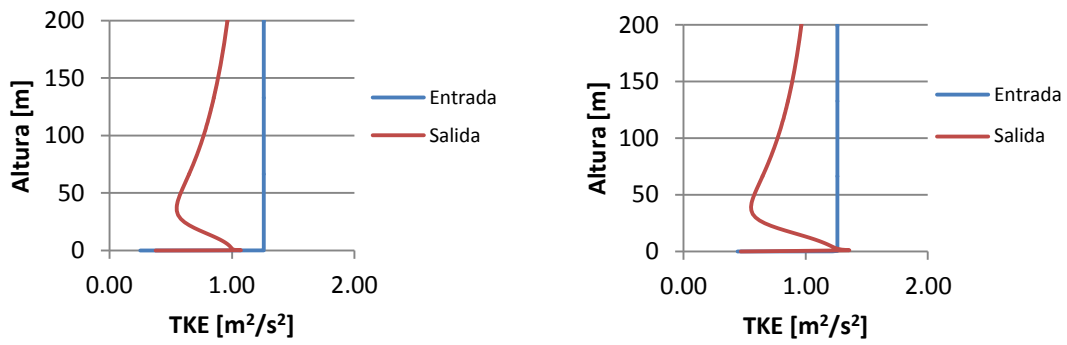
Los valores empleados para las variables en el caso de control son los siguientes:

$$\begin{array}{llll} z_0 = 0.03 \text{ m} & z_{\text{ground}} = 0 & U_{\text{ref}} = 10 \text{ m/s} & H_{\text{ref}} = 20 \text{ m} \\ W_{\text{ref}} = (1 \ 0 \ 0) & k_{\text{inlet}} = 1.26 \text{ m}^2/\text{s}^2 & u_* = 0.615 \text{ m} & k_s = 0.6 \text{ m} \end{array}$$

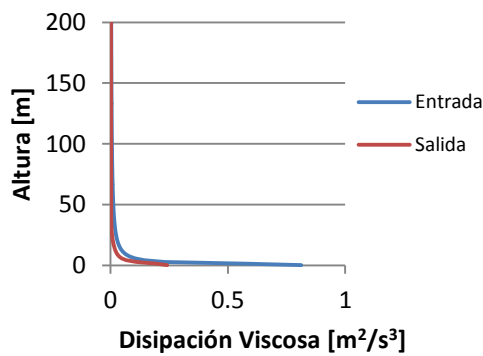
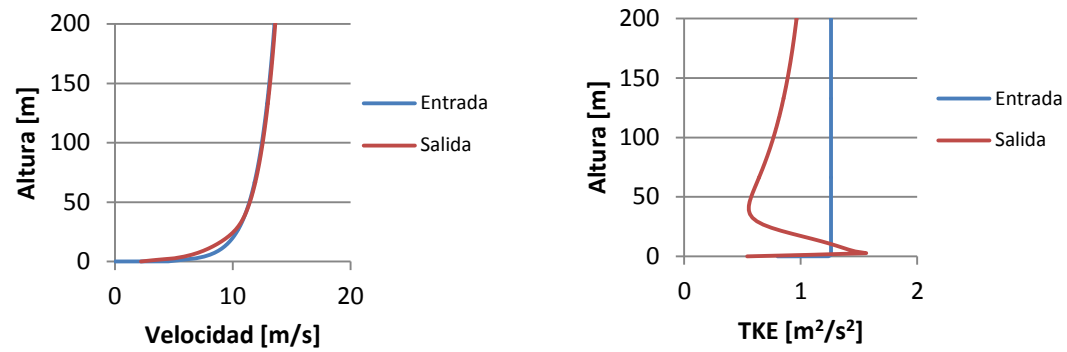
Donde la velocidad de fricción  $u_*$  se calcula despejando en la expresión (25) y la energía cinética turbulenta según (26)

Nuevamente el mallado se ha realizado teniendo en consideración lo comentado en el apartado 2.1.2.2.4, es decir, se procurará que el centro de la primera celda tenga una altura superior al valor de la rugosidad de grano de arena, aun así, se ensayarán también alturas de celda por debajo del valor recomendado, para tratar de determinar de forma cuantitativa la influencia de respetar o no dicha condición. Se realizarán los ensayos para las siguientes alturas de la primera celda: 0.1, 0.5, y 1.3.



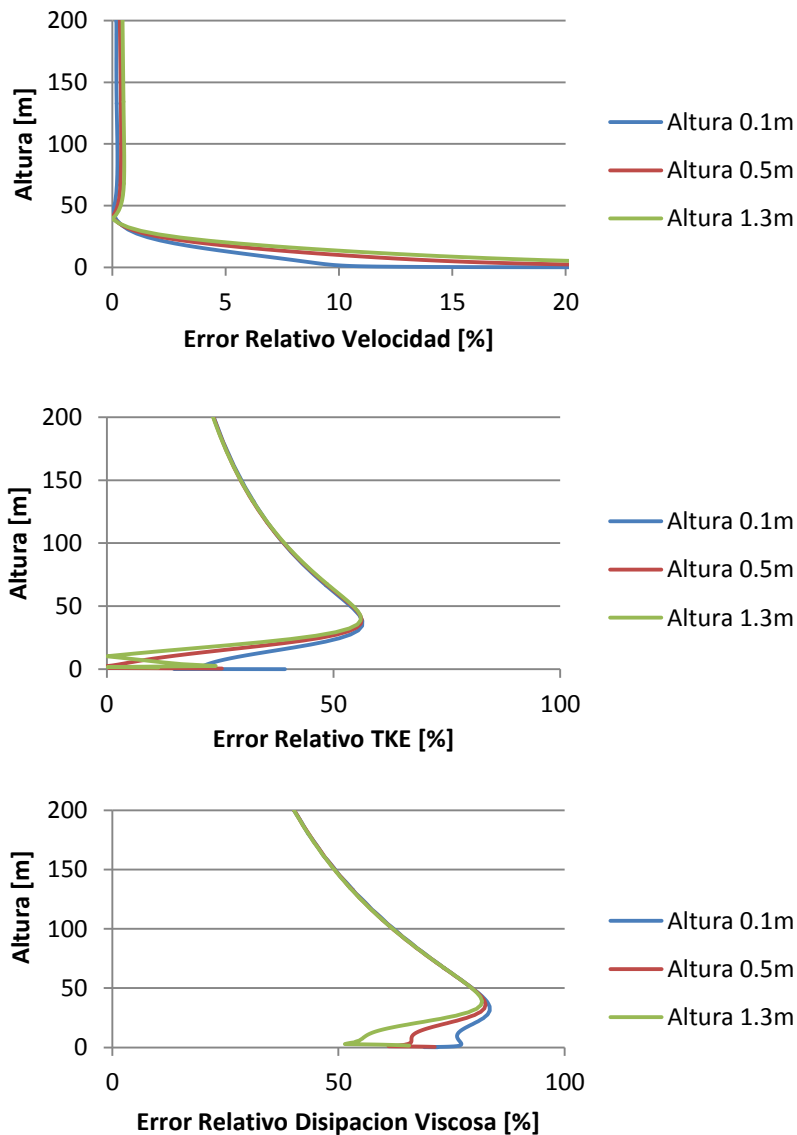


Altura 1<sup>a</sup> Celda 1.3m



Las variaciones pueden apreciarse mejor si se muestran las gráficas de error relativo:

TABLE 3: GRÁFICAS DE ERROR RELATIVO CON MODELO k-epsilon ESTÁNDAR Y RUGOSIDAD 0.03 m



Se aprecia claramente que el incremento en la rugosidad del terreno origina importantes desviaciones en los perfiles de salida con respecto a los de entrada. Aunque los resultados son similares para los tres niveles de altura de la primera celda, se aprecia una menor desviación en el caso de la malla de 1.3m de altura, que es la que cumple con el requisito impuesto para el modelado de la rugosidad.

Además, como puede comprobarse en este ejemplo, los valores de energía cinética turbulenta son muy inferiores a los observados en la atmósfera, aspecto este que ya había sido señalado anteriormente. Se plantea así el dilema de la necesidad o no de modificar los perfiles de entrada de tal manera que se tenga en cuenta la no uniformidad con la altura o los mayores niveles de turbulencia habitualmente medidos. Se han planteado distintas aproximaciones al tema aunque sin que se haya logrado una solución universal (Richards and Norris 2011).

El mayor desvío en los perfiles que se observa cuando la rugosidad aerodinámica es la correspondiente a un entorno aeroportuario, unido a los perfiles de energía cinética turbulenta poco realistas que se obtienen, hacen que el modelo de (Richards and Hoxey 1993) por sí mismo resulte inadecuado para modelar la capa límite terrestre. La única alternativa es por tanto aplicarle modificaciones que impliquen alteraciones en el código del modelo numérico de turbulencia o bien en sus funciones de pared.

### 3.2.4.3. Alternativas para el modelado de la capa límite terrestre

Son varios los trabajos que se han presentado en los últimos años tratando de explorar esta vía.

- Así por ejemplo, (Gorlé, et al. 2009) realiza un trabajo en el que estudia el efecto que tiene sobre la dispersión de contaminantes los niveles de turbulencia registrados a la entrada. Para ello busca un conjunto de condiciones de contorno consistentes, que no originen una caída artificial en los niveles de turbulencia a medida que se avanza a través del dominio. Como ya indicara (Franke, Hellsten, et al. 2007), se recomienda el uso de perfiles de la energía cinética de la turbulencia  $k$  procedentes de mediciones. Así, para conseguir un equilibrio entre los perfiles utilizados en la entrada y el modelo numérico, emplea una expresión cuya salida se ajusta a las medidas de  $k$ , dicha expresión (45) fue inicialmente propuesta en (Yang, et al. 2007)

$$k(z) = \sqrt{A \ln(z + z_0) + B} \quad (45)$$

Donde A y B son constantes calculadas de tal forma que la desviación entre el perfil dado por la expresión (45) y el medido sea la menor posible. La variable disipación viscosa es calculada conforme a la afirmación, ya manifestada previamente en (Yang, et al. 2009), de que asumiendo equilibrio entre los valores de producción y disipación de la turbulencia, el perfil de la disipación viscosa ( $\varepsilon$ ) puede calcularse mediante la siguiente expresión obtenida a partir de (18) y (11):

$$\varepsilon(z) = \sqrt{C_\mu k(z)} \frac{du}{dz} \quad (46)$$

Como puede observarse, esta expresión es la misma que aparece propuesta también en el trabajo de (Parente, Gorlé, et al. 2011). Con esto es posible calcular el valor del perfil de épsilon sin más que sustituir la expresión (45) y la derivada del perfil logarítmico de velocidad de entrada en (46):

$$\varepsilon(z) = \sqrt{A \ln(z + z_0) + B} \frac{\sqrt{C_\mu} u_*}{\kappa(z + z_0)} \quad (47)$$

Ahora bien, la simple imposición de dichos perfiles en la entrada no proporciona una solución correcta y el modelo no es capaz de mantener el nivel de turbulencia

a través del dominio simulado. Estas condiciones deben cumplir que los esfuerzos viscosos sean constantes con la altura, lo cual conduce a una definición del coeficiente  $C_\mu$  dada por la expresión (48),

$$C_\mu(z) = \frac{u^{*4}}{A \ln(z + z_0) + B} \quad (48)$$

quedando así relacionado con el valor de la velocidad de fricción y la energía cinética turbulenta, puesto que esta última varía con la altura, así debería hacerlo también el valor del coeficiente. Para evitar esta situación los autores optan por simplificar el problema, haciendo que sea constante con el valor correspondiente a la primera de las celdas. Para que pueda satisfacerse la ecuación de conservación de la  $\varepsilon$  debe cumplirse la siguiente relación para  $\sigma_\varepsilon(z)$ :

$$\sigma_\varepsilon(z) = \frac{\kappa^2(-A/2 + k(z)^2)}{u_*^2(C_2 - C_1)k(z)[1 - E(z + z_0)]} \quad (49)$$

Donde  $E$  es una función dada por:

$$E = \frac{1}{2} \frac{e^{B/A} \sqrt{\pi} \left( -1 + \text{Erf}(\sqrt{k(z)^2/A}) \right)}{\sqrt{k(z)^2/A}} \quad (50)$$

Ambas expresiones pueden simplificarse notablemente si se asume  $E=0$ , lo que permite simplificar la expresión (49) a:

$$\sigma_\varepsilon(z) = \frac{\kappa^2(-A/2 + k(z)^2)}{u_*^2(C_2 - C_1)k(z)} \quad (51)$$

La expresión resultante es por tanto dependiente de la altura y debe ser impuesta mediante las modificaciones oportunas en el código de simulación. Según el autor, con estas modificaciones se consigue que los perfiles de salida para las velocidades sean idénticos a los de entrada, observándose únicamente pequeñas desviaciones en los perfiles de la disipación viscosa y la energía cinética de la turbulencia.

Se debe señalar no obstante que esta propuesta no soluciona las dificultades relacionadas con el modelado de la pared rugosa y la obligación que imponen los códigos numéricos de que la altura del centro de la primera celda sea superior al valor de la rugosidad de grano de arena.

- Más recientemente, (Parente, Gorlé, et al. 2011), ha publicado una nueva propuesta de modificación del modelo *k-epsilon* y de las funciones de pared con la intención de mejorar el modelado de la ABL, permitiendo fijar conjuntos arbitrarios de condiciones de entrada. Para ello, introduce dos términos productores en las ecuaciones de la  $k$  y la  $\varepsilon$ , asegurando así que los perfiles satisfacen las ecuaciones del modelo. Además desarrolla dos nuevas implementaciones de las funciones de pared para superficies rugosas basadas en la



rugosidad aerodinámica y no en la rugosidad de grano de arena, formulando así un modelo similar al empleado por (Richards and Hoxey 1993).

Como ya se había comentado anteriormente, para que los perfiles de entrada dados en las ecuaciones (25), (26) y (27) sean solución de las ecuaciones (17), (18) y (19) debe cumplirse la relación planteada en (28) para el número de Prandtl de la disipación turbulenta ( $\sigma_\varepsilon$ ). Sin embargo, en la formulación del modelo de (Parente, Gorré, et al. 2011), el valor para  $\sigma_\varepsilon$  puede ser mantenido constante a cambio de añadir un término generador ( $S_\varepsilon$ ) en la ecuación de la disipación:

$$S_\varepsilon(z) = \frac{\rho u^{*4}}{(z + z_0)^2} \left( \frac{(C_1 - C_2)\sqrt{C_\mu}}{\kappa^2} - \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \right) \quad (52)$$

Este método también había sido sugerido anteriormente por (Pontiggia, et al. 2009) y permite que no sea necesario resolver en cada iteración el valor de  $\sigma_\varepsilon$ , puesto que el propio término  $S_\varepsilon$  es el que se adapta a las características de la ABL. Ambas opciones son también aplicables a este nuevo modelo como consecuencia de asumir equilibrio entre producción y disipación y por la generalización del término  $C_\mu$  (Parente, Gorré, et al. 2011).

Además, considera que, puesto que el perfil de entrada para la energía cinética turbulenta puede no ser constante con la altura, según sugieren los trabajos de (Xie, et al. 2004) o (Yang, et al. 2009), se debe adaptar el parámetro  $C_\mu$  de tal forma que cumpla la relación:

$$C_\mu(z) = \frac{u^{*4}}{k(z)^2} \quad (53)$$

Que puede deducirse asumiendo equilibrio local entre producción y disipación de la turbulencia y sustituyendo la ecuación (46) en (25) y empleando la definición de la viscosidad turbulenta (11). Esta definición del término  $C_\mu$  basada en asumir equilibrio entre producción y disipación turbulenta implica asumir igualmente que el gradiente de  $k$  no introduce difusión vertical de sí misma. Este supuesto se justifica porque los datos experimentales muestran que la difusión de  $k$  es despreciable frente a sus términos de producción y disipación.

Un nuevo término generador debe añadirse también a la ecuación de transporte de la energía cinética turbulenta, para asegurar el equilibrio entre producción y disipación. Esto se debe a que la expresión (45) que emplea el autor para calcular la energía cinética de la turbulencia ya no es solución para la ecuación de transporte de  $k$ , por ello sustituyendo (53) y (45) en la ecuación (18):

$$S_k(z) = \frac{\rho u^* \kappa}{\sigma_k} \frac{\partial}{\partial z} \left( (z + z_0) \frac{\partial k}{\partial z} \right) \quad (54)$$

Así, esta formulación del modelo es válida para cualquier perfil de entrada para la  $k$ , y con un perfil para la  $\varepsilon$  dado por:

$$\varepsilon(z) = \sqrt{C_\mu k} \frac{du}{dz} \quad (55)$$

Igualmente, puesto que han sido observadas inconsistencias entre la formulación de las funciones de pared y las condiciones de contorno a la entrada, propone modificaciones en el modelado de la celda adyacente a la pared. Así, especifica los valores de la velocidad, la energía cinética turbulenta y la disipación viscosa mediante una formulación consistente con los perfiles de entrada para la velocidad y la turbulencia. Estas expresiones son función del valor de la rugosidad aerodinámica  $z_0$ :

$$\begin{aligned} u_w &= \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z_p + z_0}{z_0}\right) \\ \varepsilon_w &= \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{\kappa(z_p + z_0)} \\ G_k &= \frac{\tau_w^2}{\rho \kappa C_\mu^{0.25} k^{0.5} (z_p + z_0)} \end{aligned} \quad (56)$$

De tal forma que la producción de energía cinética turbulenta en la pared es calculada en una ubicación desplazada por la rugosidad aerodinámica, para asegurar consistencia con el cálculo de la disipación viscosa.

En lo que se refiere a la implementación numérica, la forma de la ley universal de pared  $u = \frac{u^*}{\kappa} \ln(E' z^{+'})$  se conserva mediante la introducción una nueva constante y la distancia adimensional a la pared (Parente y Benocci 2010):

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln(E' z^{+'}) \quad (57)$$

Donde

$$\begin{aligned} E' &= \frac{\nu}{z_0 u^*} \\ z^{+'} &= \frac{(z_p + z_0) u^*}{\nu} \end{aligned} \quad (58)$$

La velocidad de fricción puede calcularse localmente mediante  $u^* = C_\mu^{0.25} k^{0.5}$

De esta forma, basando las funciones de pared en la rugosidad aerodinámica, se evitan limitaciones en la altura de la primera celda.

### 3.2.4.4. Modelo adoptado para simulación de la capa límite terrestre e implementación en el código CFD

La propuesta de (Parente, Gorré, et al. 2011) constituye el intento más actual para adaptar el modelo *k-epsilon* al correcto modelado de la capa límite atmosférica. Su propuesta ofrece unos resultados ciertamente interesantes y es por ello que se ha optado por su implementación en el código fuente de OpenFOAM, entre las principales ventajas que ofrece la elección de este modelo numérico cabe citar:

- Es un modelo válido para cualquier perfil de entrada para la energía cinética de la turbulencia (TKE).
- El empleo de funciones de pared basadas en la rugosidad aerodinámica permite reducir la altura de la primera celda sin las restricciones que imponía el uso de la rugosidad de grano de arena.

El modelo y las modificaciones propuestas han sido planteados con gran detalle en el apartado anterior. Los cambios afectan a dos elementos del código numérico, el modelo de turbulencia *k-epsilon* y la definición de sus funciones de pared:

#### 3.2.4.4.1. Modificación del modelo de turbulencia *k-epsilon*

La implementación de las ecuaciones del modelo *k-epsilon* en OpenFOAM viene recogida en los ficheros *kEpsilon.C* y *kEpsilon.H*. En el fichero *.C* se encuentran las ecuaciones de transporte para la *k* y la *epsilon* escritas en el formato de OpenFOAM y que se reproducen a continuación:

- Ecuación de transporte para la *k*:

$$\begin{aligned}
 & \text{fvm::ddt}(k_) \\
 & + \text{fvm::div}(\text{phi}_, k_) \\
 & - \text{fvm::Sp}(\text{fvc::div}(\text{phi}_), k_) \\
 & - \text{fvm::laplacian}(\text{nut}_ + \text{nu}(), k_) \\
 & \text{==} \\
 & + G \\
 & - \text{fvm::Sp}(\text{epsilon}_/k_, k_)
 \end{aligned}$$

- Ecuación de transporte para la *epsilon*:

$$\begin{aligned}
 & \text{fvm::ddt}(\text{epsilon}_) \\
 & + \text{fvm::div}(\text{phi}_, \text{epsilon}_) \\
 & - \text{fvm::Sp}(\text{fvc::div}(\text{phi}_), \text{epsilon}_) \\
 & - \text{fvm::laplacian}(\text{nut}_/\text{SigmaEps} + \text{nu}(), \text{epsilon}_) \\
 & \text{==} \\
 & C1_*G*\text{epsilon}_/k_ \\
 & - \text{fvm::Sp}(C2_*\text{epsilon}_/k_, \text{epsilon}_)
 \end{aligned}$$

- Donde el término G viene dado por:

$$\text{nut\_} * 2 * \text{magSqr}(\text{symm}(\text{fvc} :: \text{grad}(\text{U\_})))$$

Las modificaciones realizadas al código contenido en los ficheros .C y .H para adaptarlo así al modelo propuesto por (Parente, Gorlé, et al. 2011) son las siguientes:

1. La formulación del modelo permite elegir entre introducir un término productor en la ecuación de transporte de  $\epsilon$  o bien cambiar la definición del coeficiente  $\sigma_\epsilon$ . Puesto que el término productor de  $\epsilon$  incluye coeficientes únicos para cada problema que deben calcularse en función del perfil de  $k$ , se opta por cambiar el valor de  $\sigma_\epsilon$ , ya que así se consigue una formulación universal independiente de los perfiles de entrada.
2. Se define la velocidad de fricción ( $u^*$ ) como nuevo coeficiente para el modelo de turbulencia.
3. Se cambia la definición del coeficiente  $C_\mu$ , siendo sustituido en los sitios en que aparece por la relación  $u^{*4}/k^2$ .
4. Se incluye el nuevo término productor de  $k$  (54) en su ecuación de transporte.

#### 3.2.4.4.2. Modificación del modelo de pared

El modelo de pared en OpenFOAM se implementa a través de las condiciones de contorno para las variables turbulentas. En OpenFOAM la función de pared para la  $k$  funciona como una condición *zeroGradient* (desde el punto de vista numérico obliga a que el valor de la variable en la pared y en el punto medio de la primera celda sea el mismo), por lo que no requiere ser modificada. Por su parte los modelos de disipación viscosa y viscosidad turbulenta (con rugosidad) en la pared se definen originalmente en los archivos *epsilonWallFunctionFvPatchScalarField* y *nutkRoughWallFunctionFvPatchScalarField*. Las modificaciones realizadas en ellos son las ya indicadas anteriormente:

- *epsilon*: Modificar los términos que definen el valor de la viscosidad y de producción de energía cinética turbulenta en la primera celda de forma que se correspondan con los indicados en (56) y (56).
- *Viscosidad turbulenta*: Es la que permite definir en última instancia el gradiente de velocidades en la pared y por tanto el valor de la velocidad para la primera celda. Por ello se modifican los términos  $E$  y  $z^+$  en el interior del logaritmo por los  $E'$  y  $z^{+'}$  definidos en (58).

#### 3.2.4.5. Validación del modelo $k$ - $\epsilon$ modificado

Los valores empleados para configurar el caso de validación son los mismos que en la anterior ocasión con el fin de poder comprobar las mejoras conseguidas en el modelado. La única excepción la constituye la rugosidad de grano de arena, que ya no es necesario

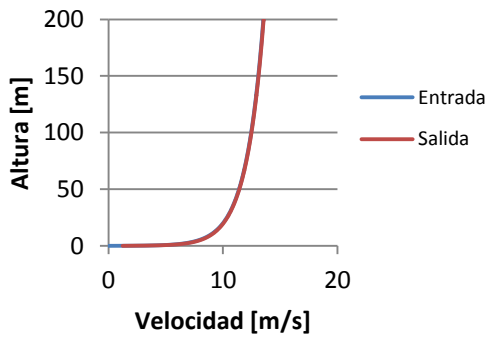
emplearla con el nuevo sistema de modelado. Los valores para las variables son los siguientes:

$$z_0 = 0.03 \text{ m} \quad z_{\text{ground}} = 0 \quad U_{\text{ref}} = 10 \text{ m/s} \quad H_{\text{ref}} = 20 \text{ m}$$

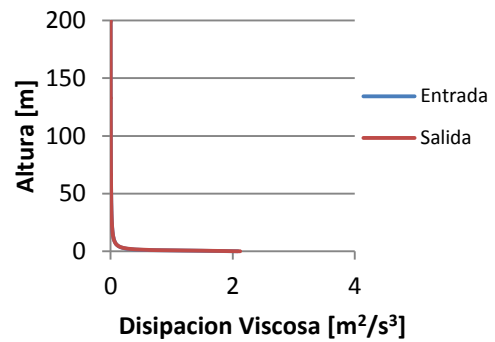
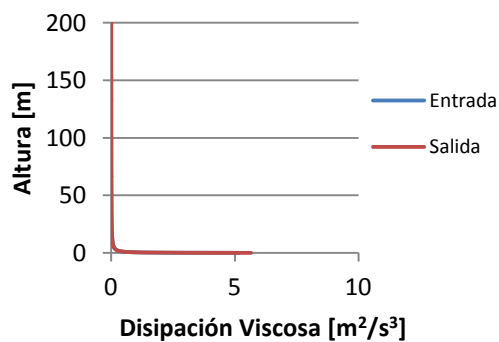
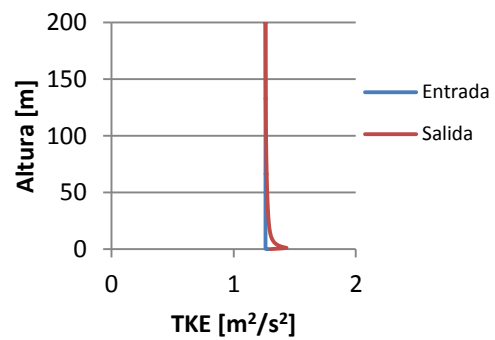
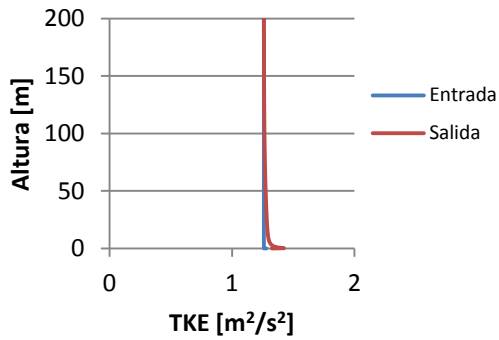
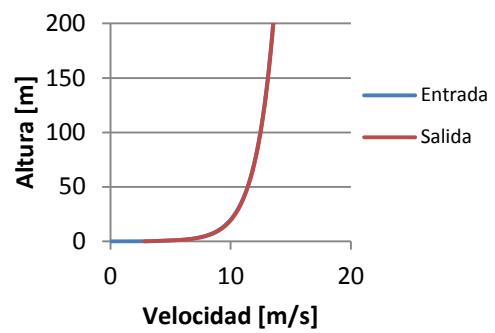
$$W_{\text{ref}} = (1 \ 0 \ 0) \quad k_{\text{inlet}} = 1.26 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad u_* = 0.615 \text{ m/s}$$

Los resultados obtenidos de las simulaciones, realizadas nuevamente para tres mallas con diferentes alturas de la primera celda son las siguientes:

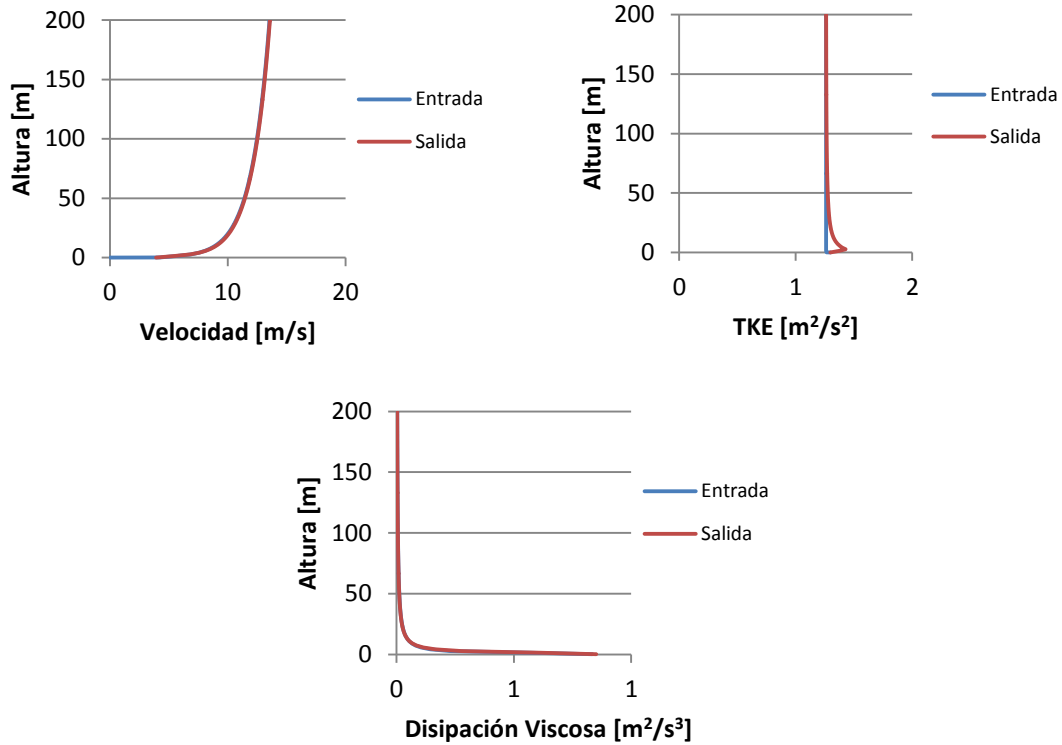
Altura 1ª Celda 0.1m



Altura 1ª Celda 0.5m

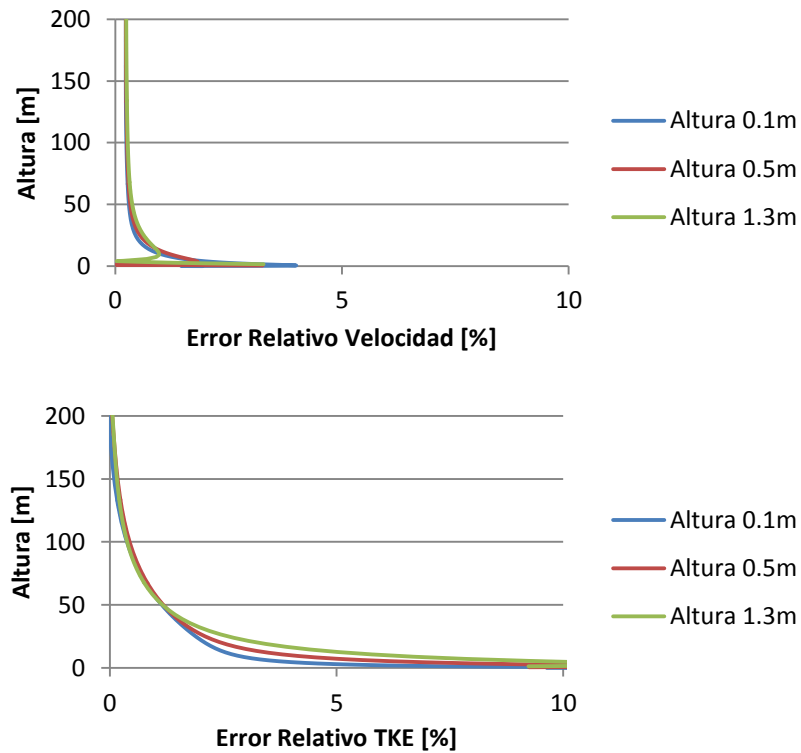


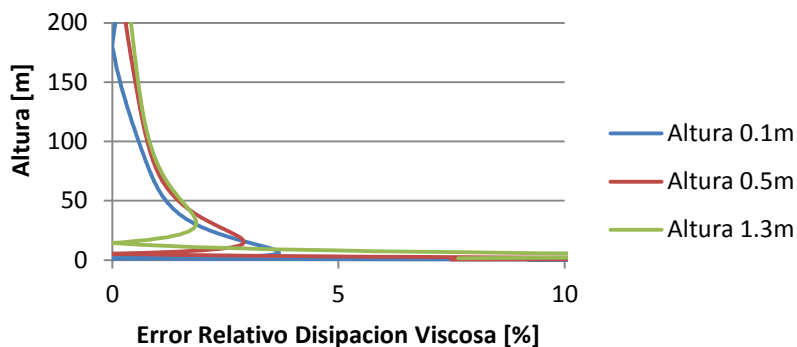
Altura 1ª Celda 1.3m



Las variaciones pueden apreciarse mejor si se muestran las gráficas de error relativo:

TABLE 4: GRÁFICAS DE ERROR RELATIVO CON MODELO k-epsilon MODIFICADO Y RUGOSIDAD 0.03 m





### 3.2.4.6. Conclusiones del caso de validación del modelo CFD

La mejora en los resultados con respecto al modelo estándar es clara. Para la velocidad, la variable de mayor importancia en la mayor parte de las simulaciones, la diferencia máxima entre entrada y salida es del 4% para celdas de 0.1 m. de altura, aunque dicha diferencia cae rápidamente, siendo inferior al 2% en alturas superiores a los 5 metros. En el caso de la energía cinética turbulenta la mejora respecto al modelo estándar es aún mucho mayor, las diferencias entre las magnitudes de entrada y salida son de aproximadamente el 6% a dos metros y del 4% a 5 metros continuando con el descenso conforme se aumenta la altura. Finalmente, los perfiles para la disipación viscosa presentan una mayor variación a medida que se avanza a través del dominio, a pesar de ello se encuentran dentro de unos niveles razonables, especialmente si tenemos en cuenta que es la variable de menor interés para el post-procesado de los resultados.

Por todo ello se considera que el código CFD de OpenFOAM basado en el modelo de turbulencia *k-epsilon* adaptado a la simulación de la capa límite atmosférica tiene la precisión suficiente para realizar con él las simulaciones de campos de viento locales, principal objetivo de esta tesis.

## 3.3. PROCEDIMIENTO DE ASIMILACIÓN

Una vez definidos los modelos de mesoescala y microescala deben elaborarse una serie de procedimientos y herramientas que permitan el acoplamiento efectivo de ambos, lo cual se consigue cuando ambos modelos guardan una coherencia entre sus interfaces y variables de operación que permiten el correcto flujo de datos.

Para poder realizar dicho proceso de asimilación deben abordarse una serie de cuestiones que serán tratadas con detalle en los sucesivos apartados:

### 3.3.1. ELABORACIÓN DEL DOMINIO DE SIMULACIÓN DE MICROESCALA SOBRE TERRENO COMPLEJO

Uno de los principales retos es la elaboración de un dominio de simulación, convenientemente discretizado, sobre el cual se aplicarán las ecuaciones de modelado. Para ello resultará de gran utilidad la estructura de código abierto del programa OpenFOAM, ya que esto permitirá la elaboración mediante códigos de desarrollo propio de los archivos de definición de la malla.

El primer paso es disponer de los datos de elevación del terreno con la mayor calidad posible. Para ello se recurre a los modelos digitales de elevación elaborados por el Instituto Geográfico Nacional en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, con una precisión de 25 cm. Estos datos son públicos y se ofrecen en formato geoTIFF, estándar de metadatos de dominio público que permite que información georreferenciada sea encajada en un archivo de imagen de formato TIFF. La hoja dentro de la cual se encuentra el aeropuerto de León y sus alrededores es la número 161.

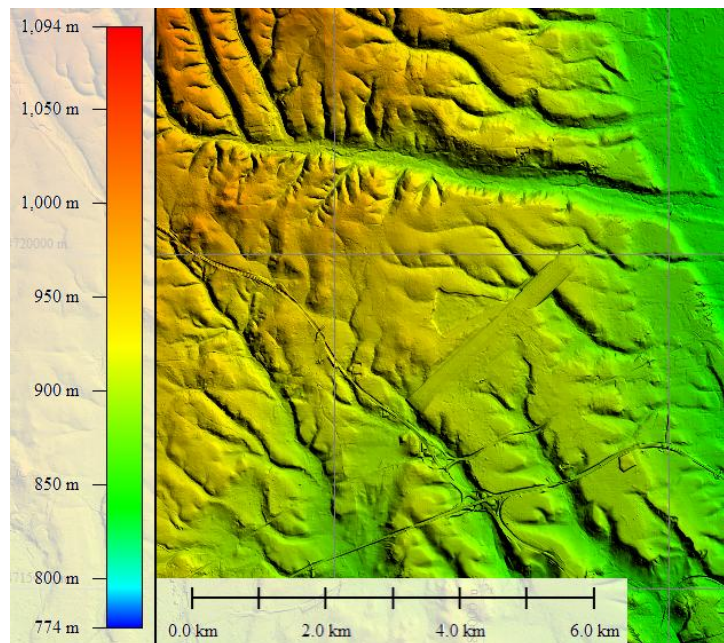


FIGURE 23: ENTORNO DEL AEROPUERTO DE LEÓN VISTO SEGÚN UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

Por su parte, el terreno empleado en el WRF dispone de una resolución mucho menor, como corresponde a un modelo cuya resolución de celda es únicamente de 1.5 km.

Esta discrepancia geométrica que se presenta entre los terrenos empleados en ambos modelos debe ser tenida en cuenta durante la elaboración del dominio de microescala, de tal forma que pueda permitir un correcto acoplamiento de las variables.

La definición de la malla en OpenFOAM se realiza mediante un archivo conocido como *blockMeshDict*, el cual permite definir paralelepípedos que posteriormente pueden subdividirse en un número arbitrario de celdas mediante sucesivas divisiones aplicadas en sus laterales. En el archivo deben definirse en la forma adecuada los siguientes elementos:



1. Los vértices de los paralelepípedos que forman la malla.
2. El número y forma en que se realizan las subdivisiones de los paralelepípedos.
3. Aquellos lados de los paralelepípedos que constituyen la frontera exterior del dominio simulado.

Se elabora así un código de desarrollo propio capaz de generar dicho archivo de definición a la vista de todo lo anterior siguiendo el método que se expone a continuación:

- El usuario define sobre el plano en coordenadas UTM las esquinas del dominio, así como el número de divisiones que desea realizar en cada una de las dimensiones del plano, lo que determinarán el ancho y el largo de cada uno de los bloques. Con ello se establece una matriz de puntos en el plano xy que constituyen las bases de los paralelepípedos en que se dividirá el dominio. Una vez definidas las posiciones en el plano horizontal para dichos vértices debe establecerse su altura vertical, para lo cual se accede al archivo de elevaciones con las coordenadas utm correspondientes al punto y se comprueba su coordenada z. Se determinan los vértices que forman el techo del paralelepípedo sumando la altura deseada a las coordenadas de la base. Puede apreciarse el resultado en Figure 24.

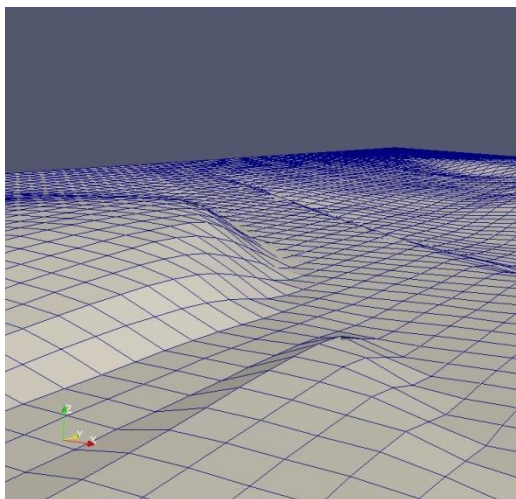


FIGURE 24: BASE DE LA MALLA ELABORADA PARA EL CFD SIGUIENDO LA OROGRAFÍA DEL TERRENO

Para asegurar la correspondencia geométrica entre los terrenos de ambos dominios (meso y microescala) se crea en la malla del CFD una zona de transición entre la orografía de alta resolución que es empleada en el modelo de microescala y las más burda del modelo de mesoescala, que será la que defina el borde exterior del dominio (véase Figure 25). Esta solución es similar a la adoptada por otros autores como (Zajaczkowski, Haupt and Schmehl 2011), aunque en su trabajo se ajusta únicamente a una altura arbitraria fijada por el autor mientras que en este caso el ajuste se realiza al terreno definido en el modelo de mesoescala.

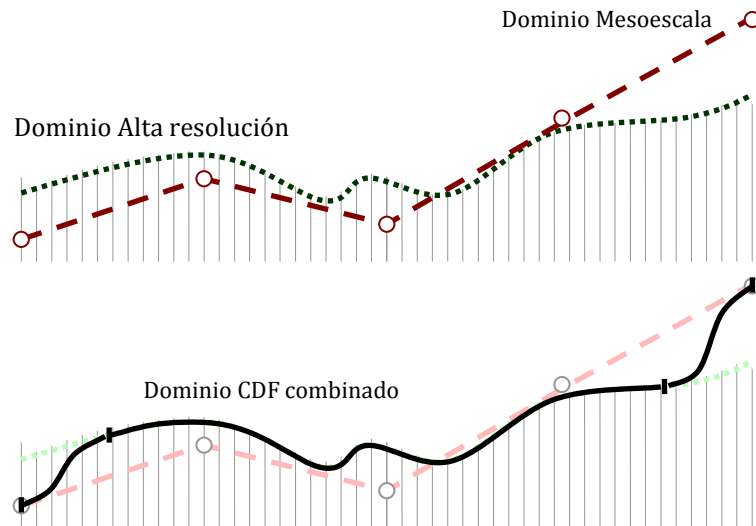


FIGURE 25: ACOPLAMIENTO EN ALTURAS ENTRE LOS TERRENOS DE ALTA Y BAJA RESOLUCIÓN

- Una vez definidos los paralelepípedos que permiten subdividir el dominio, deben definirse en el archivo *blockMeshDict* el número de divisiones que se les realizarán en cada uno de sus ejes. En el caso de los ejes  $x$  e  $y$  dicho número será igual a 1, puesto que las caras de la base ya se han elaborado según el tamaño que se les desea proporcionar. Para las divisiones en el eje  $z$  deben proporcionarse dos valores, el número total de divisiones a realizar ( $d$ ) y el gradiente ( $G$ ) con el que se realizan dichas divisiones, con el fin de que las celdas sean más pequeñas en las inmediaciones del suelo y mayores al crecer la altura. Dicho gradiente viene definido en OpenFOAM por la relación existente entre las alturas de la última celda ( $e$ ) y la primera ( $s$ )  $G = e/s$  y puede definirse en función de la longitud total de la dimensión ( $h$ ) y el número de celdas ( $n$ ) mediante las siguientes expresiones:

$$G = x^{(n-1)}$$

$$h = s \frac{1 - x^n}{1 - x} \quad (59)$$

Donde  $x$  es el factor de crecimiento (relación existe entre el tamaño de una celda y la siguiente) y se emplea como variable intermedia para el cálculo del gradiente  $G$ .

- Finalmente se definen de la forma conveniente las caras de los paralelepípedos que constituyen el contorno o frontera exterior del dominio. Los nombres asignados a cada una de las caras del contorno, y por los que serán referidas de aquí en adelante, son los de la dirección cardinal hacia la cual se dirige un vector normal a la cara que apunte hacia el exterior del dominio.



FIGURE 26: VISTA EN PLANTA DEL DOMINIO DE MICROESCALA YA FINALIZADO

### 3.3.2. ASIMILACIÓN DE LAS VARIABLES

Diversas han sido las técnicas empleadas para trasladar la información recogida en los modelos de mesoescala para las variables fluidas y tratar de incorporarla a los modelos de dinámica de fluidos computacional.

Uno de los métodos que ha sido empleado en la bibliografía es el nudging (Zajaczkowski, Haupt and Schmehl 2011). Esta técnica, desarrollada y empleada en los modelos de mesoescala para hacer que sus simulaciones converjan en determinadas zonas de la misma a los valores obtenidos mediante observaciones, no es un procedimiento habitual en el ámbito del CFD. Los resultados del citado trabajo parecen indicar que este método permite conseguir que el campo de velocidades en el modelo CFD se desarrolle según los valores que marcan los perfiles asimilados del modelo de mesoescala, pero permitiendo mantener la conservación de masas del modelo CFD.

Otro procedimiento más habitual pasa por imponer como condición de contorno de las variables simuladas los perfiles obtenidos en el modelo de mesoescala. Aunque para incluir los efectos globales podría ser suficiente con fijar los perfiles de velocidades, tal como se realiza en (Zajaczkowski, Haupt and Schmehl 2011), la posibilidad de incluir adicionalmente información de las variables de la turbulencia debe ser aprovechada en aras no sólo de una mayor precisión en los resultados obtenidos, sino también para recoger la influencia que el terreno aguas arriba del dominio tiene sobre dichas variables. Así por ejemplo en (Gorlé, et al. 2009) se recomienda que siempre que sea posible se empleen perfiles de entrada para la energía cinética turbulenta procedentes de mediciones, en este caso los perfiles procedentes del modelo de mesoescala constituyen la mejor aproximación disponible en cada caso a una medición real.

Ahora bien, la inclusión de dichas variables añade una dificultad adicional en el proceso de acoplamiento entre ambos modelos y la fijación de las adecuadas condiciones de contorno para las nuevas variables incluidas. Una de las técnicas más empleadas tradicionalmente

por los ingenieros responsables de estudios computacionales del viento ha sido la imposición de condiciones de contorno periódicas para las variables turbulentas. Con ella los perfiles de las magnitudes se ajustan en el dominio simulado a la geometría y rugosidad del terreno objeto de estudio y pueden ser reutilizadas como condiciones de entrada al mismo. Ahora bien, como se recoge en (Moeng, et al. 2007), la utilización de condiciones de contorno de tipo cíclico es claramente inapropiada para simular la capa límite atmosférica cuando esta es no-homogénea en cualquiera de las direcciones del plano horizontal, ya sea en el interior del dominio simulado o bien aguas arriba. En tal caso, las fluctuaciones en los perfiles fácilmente ocasionarán que sus valores a la salida sean notablemente diferentes que a la entrada.

Descartada así la utilización de condiciones de contorno cíclicas, se expone a continuación con detalle el método de implementación de las condiciones de contorno en el modelo CFD.

### 3.3.2.1. Asimilación de la velocidad

El acoplamiento al modelo de microescala de los perfiles de velocidad obtenidos del modelo de mesoescala se ve facilitado, como ya se ha indicado anteriormente, por la compatibilidad geométrica impuesta en los límites del dominio.

Puesto que la nube de puntos en los cuales se definen las variables es mucho más densa en el modelo CFD, debe definirse el método mediante el cual se calcula el valor de la velocidad en cada uno de ellos a partir de los valores más dispersos que proporciona el modelo de mesoescala. Así, para cada uno de los puntos en los cuales debe fijarse el valor correspondiente a la variable, se buscan los cuatro nodos más próximos del dominio de mesoescala, dando lugar a un cubo alrededor del punto de cálculo que permite llevar a cabo una interpolación lineal en la que se tienen en cuenta las distancias del punto a cada uno de los vértices, donde los valores de la variable son conocidos.

Especial mención merece el cálculo de la velocidad en las celdas más próximas al terreno. En este caso el ajuste de la velocidad entre la altura de la primera celda del WRF y el suelo no se realiza mediante una interpolación lineal, sino que se realiza un ajuste mediante la ley logarítmica (60), empleando para ello el valor de la rugosidad del terreno y de la velocidad de fricción.

$$U(h) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) \quad (60)$$

### 3.3.2.2. Asimilación de las variables de la turbulencia:

Como se ha indicado anteriormente el perfil de la energía cinética turbulenta ( $k$ ) se obtiene directamente del modelo de mesoescala, ya que es proporcionado por el modelo de capa límite empleado (Mellor-Yamada Nakanishi and Niino o MYNN).

La dificultad se traslada por tanto a la tarea de determinar el perfil más adecuado para la disipación viscosa ( $\varepsilon$ ), ya que dicha variable no es proporcionada por el modelo de mesoescala. Han sido varios los métodos empleados hasta la fecha y recogidos en la bibliografía:

✚ Entre los investigadores que han trabajado en métodos de acoplamiento similares a los estudiados en este trabajo, empleado además el modelo  $k-\varepsilon$ , pueden señalarse fundamentalmente:

- En (Baik, Park and Kim 2009) emplean el software de mesoescala MM5 con un modelo de capa límite MYJ<sup>9</sup> para conseguir las condiciones de contorno que serán empleadas en el CFD, donde se emplea el modelo de turbulencia  $RNG k-\varepsilon$ . En este caso el perfil de entrada para la disipación viscosa se obtiene según el procedimiento planteado en (Kim and Baik 2004), consistente en emplear la expresión (61) y sin realizar ninguna modificación adicional en el modelo.

$$\varepsilon(z) = \frac{C_{\mu}^{3/4} k^{3/2}}{\kappa \cdot z} \quad (61)$$

- En (Mochida, et al. 2011), se utiliza un software de desarrollo propio (LAWEPS) en el que sucesivamente se anidan dominios con resoluciones cada vez menores, empleando técnicas de modelado de mesoescala para los dominios grandes y modelos CFD para los dominios pequeños de alta resolución, donde el modelo de turbulencia empleado es una versión modificada del  $k-\varepsilon$ . En este caso las condiciones de contorno para la disipación viscosa ( $\varepsilon$ ) para el primer dominio con modelo CFD se fijan según la longitud de escala del dominio precedente que ha sido modelado con modelo mesoescala. Para ello emplean la relación entre la longitud de escala ( $l$ ) y la disipación viscosa ( $\varepsilon$ ) tal como fue enunciada en (Mellor 1973) y que viene dada por la expresión (62), donde  $B_1$  es una de la constante de cierre (del inglés *closure constant*) del modelo MYJ empleado. El valor de dicha constante resulta ser de 24, según el trabajo de (M. Nakanishi 2001) en el que se analizaron los valores de las constantes del modelo MYJ que permitían el mejor ajuste a los datos disponibles de simulaciones realizadas con modelos de turbulencia LES.

$$\varepsilon(z) = 2 \sqrt{\frac{2k^{3/2}}{B_1 l}} \quad (62)$$

- En (Tewari, et al. 2010) se emplea el WRF-ARW (V2.0) para proporcionar las condiciones de contorno adecuadas al modelo CFD-Urban, especialmente desarrollado para estudiar flujos en áreas urbanas. En lo

<sup>9</sup> Véase apartado 2.1.1.3 para una descripción de los modelos de capa límite.

que se refiere a la turbulencia, el WRF proporciona los valores para la energía cinética de la turbulencia y el coeficiente de difusión de momentos. De esta forma determinan el valor de la disipación viscosa acudiendo a la definición que se da del mismo en la formulación del modelo *k-epsilon*:

$$\varepsilon = \rho C_{\mu} k^2 / \mu_t \quad (63)$$

En esta fórmula la densidad  $\rho$  es calculada a partir de la ecuación de estado de los gases ideales, la energía cinética de la turbulencia  $k$  es la proporcionada por el modelo de capa límite atmosférica MYJ,  $\mu_t$  es el coeficiente de difusión de momentos obtenido del WRF y  $C_{\mu}$  es una constante del modelo de turbulencia *k-epsilon* cuyo valor por defecto es de 0.09. Empleando esta técnica, los autores señalan que los valores de disipación viscosa producidos son superiores a los esperables por la teoría. Todo ello conduce a que los campos de energía cinética de la turbulencia y disipación viscosa resultantes sean irreales, dejando el estudio de estos factores para trabajos futuros.

- ✚ Además de estos métodos, el estudio de las condiciones de contorno más adecuadas para las simulaciones de la capa límite terrestre han sido ampliamente investigadas en el marco de las técnicas CFD, constituyendo lo que ha venido a llamarse *Computational Wind Engineering* (CWE). Así, dentro de esta área, las recomendaciones en cuanto al método más adecuado para fijar las condiciones de contorno en el dominio simulado han sido ligeramente distintas. Estas recomendaciones (relativas al modelo *k-epsilon*) aparecen convenientemente expuestas en el apartado 3.2.4.3 y son las que se han seguido en este trabajo.

#### 3.3.3. CONDICIONES DE CONTORNO EN LA SIMULACIÓN DEL MODELO ACOPLADO

Las condiciones de contorno para cada una de las caras del dominio se definen siguiendo las siguientes normas según la variable de que se trate:

- Velocidad:
  - Terreno: `fixedValue` de valor 0 siempre.
  - Techo: `zeroGradient` siempre, permitiendo entrada y salida de flujo.
  - Laterales: `timeVaryingMappedFixedValue` para fijar los valores de las variables en aquellas caras por las que entra el flujo, `zeroGradient` en aquellas por las que sale.
- Presión:
  - Terreno: `zeroGradient` siempre.
  - Techo: `fixedValue` de valor 0 siempre
  - Laterales: `zeroGradient` en aquellas caras por las que entra el flujo, `fixedValue` de valor 0 en aquellas por las que sale.

- k y epsilon:
  - Terreno: wallFunction personalizadas según apartado 3.2.4.4.
  - Techo: zeroGradient siempre.
  - Laterales: timeVaryingMappedFixedValue para fijar los valores de las variables en aquellas caras por las que entra el flujo, zeroGradient en aquellas por las que sale.
- nut:
  - Terreno: función de pared basada en la rugosidad aerodinámica y con el correspondiente valor de rugosidad del terreno.
  - Techo: zeroGradient siempre.
  - Laterales: Calculated, esta variable se calcula a partir de la k y la épsilon.





## 4. WIND FIELD MEASUREMENT METHOD BASED ON FREE BUBBLE TRACKING

---

The main goal of this section is to develop a new wind profile measurement system, which will be able to provide more accurate knowledge of the full local wind speed profiles by tracking lighter than air bubbles. Then, this system, in certain conditions and applications, could be a reliable and low cost alternative to the previously explained methods (section 2.3).

### 4.1. METHOD OVERVIEW

The system goes on by tracking lighter than air bubbles (or other lighter than air targets) by means of remote sensors. These light bubbles can move freely through the atmosphere, pushed only by the wind's force, so it is possible to deduce wind speed just by knowing bubble speed. Cameras are the preferred sensor for the bubble tracking because of its relative low cost and high performance, also, bubble clusters are the ideal target because of they are harmless for planes or people, very cheap and they are not contaminant. The system has four main elements: 1 - Tracking camera, its goal is to provide bubble cluster pictures at the maximum distance and best performance. 2 - Bubble generator, it must provide bubble clusters whenever the control centre orders it. 3 - Bubble cluster, each

bubble is a thin film made with a solution of soap, glycerin and water<sup>10</sup>. 4 - Control centre, to analyze images, identifying bubble clusters and measuring its elevation and azimuth. All of them, as well as its distribution and organization, are clearly shown in Figure 27.

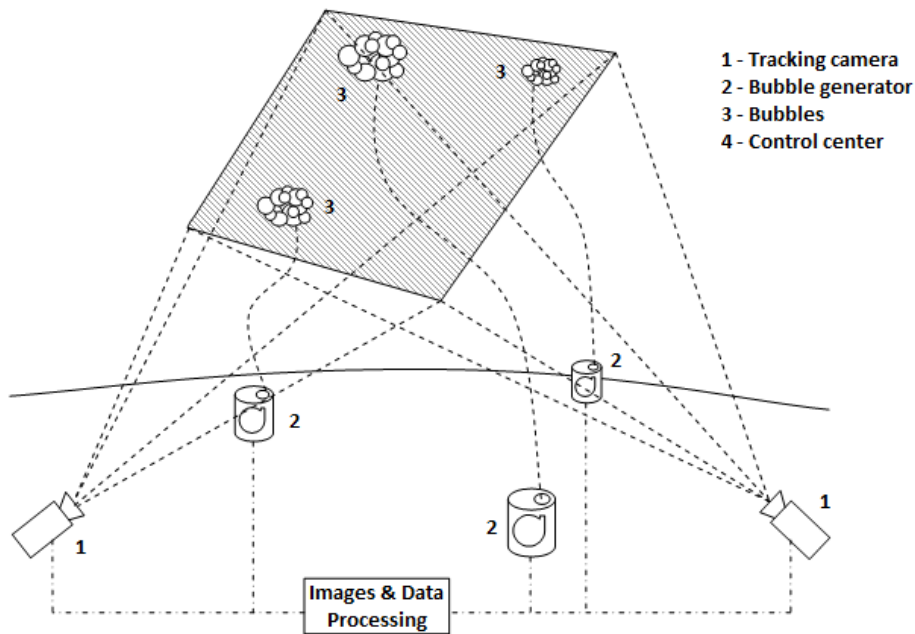


FIGURE 27: WIND SPEED PROFILE MEASUREMENT SYSTEM

#### 4.2. MODEL OF THE MOTION

The data handling and processing is a critical task for the system in order to achieve accurate and reliable measurements, for this job a Kalman filter is used. As there are none previous work about similar systems, the first objective is to design the appropriate filter and evaluate its performance.

The Kalman filter is an optimal linear estimator which provides the estimation of the state variables in noise. Since the Kalman filter was introduced by R.E. Kalman in 1960 (Kalman 1960) it has been widely used. It not only works well in practice, but it is also theoretically attractive because it has been shown that it is the filter that minimizes the variance of the estimation mean square error (MSE) (Jwo and Cho 2007).

When the process to be estimated or the measurement method do not obey to a linear procedure the Extended Kalman Filter (EKF), which linearize the estimation using the partial derivatives of the process and measurement functions, must be used (Grewal and Andrews 2008).

The whole system, including the hardware equipment and the EKF are fully scalable which is an important advantage because it is possible to use more than two cameras only changing the measurement vector in the EKF.

<sup>10</sup> Complete explanation about bubble properties and how to make them in reference (Isenberg 1992)

#### 4.2.1. THE STATE VECTOR AND ITS OBSERVATION

First, the state vector  $\mathbf{x}$  must be defined as (64); its elements are the bubble cluster position and its velocity in the three axis and acceleration in  $z$  because of the lift produced by the filling gas.

$$\mathbf{x} = [x, y, z, v_x, v_y, v_z, a_z] \quad (64)$$

The bubbles movement is not abrupt so, in small time steps, acceleration in  $x$  and  $y$  can be considered as system noise while acceleration in  $z$  can be taken as a constant (buoyancy) since bubble volume increases as external pressure/density diminishes. Therefore, bubbles movement can be discretized in this way:

$$\mathbf{x}_{t+1} = \Phi \cdot \mathbf{x}_t + \omega_t \quad (65)$$

where  $\Phi$ , state transition matrix, is defined as:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (66)$$

Where  $\Delta t$  is the time step between two consecutive states  $t$  and  $t+1$  and  $\omega_t$  the process noise, in other words, its deviation from lineal movement in the time step. That noise is assumed to be independent, with normal probability distribution and covariance  $Q$ .

Taking the angle measurements that are needed by the system is a critical task. Each camera is located in a well known location  $(x_i, y_i, z_i)$  and provides pictures which can be used to obtain azimuth ( $\beta_{Bi} = \beta_{0i} + \beta_i$ ) and elevation ( $\delta_{Bi} = \delta_{0i} + \delta_i$ ) measurements with a certain error ( $\varepsilon$ ). Also, this error is assumed to be independent, white, with normal probability distribution and covariance  $R$ . These equations, used to obtain angles measurements, can be obtained by an easy geometrical interpretation of Figure 28 and Figure 29. From bubble position coordinates, it is possible to obtain the expected measurement vector  $\mathbf{z}_m$ , which will be compared with the obtained measurement vector  $\mathbf{z}$  (79).  $\mathbf{z}_m$  can be calculated by means of the measurement function  $h(x)$  as it is defined in (80).  $h(x)$  allows to relate the state of the system to the measurements and its Jacobian can be seen in (81).

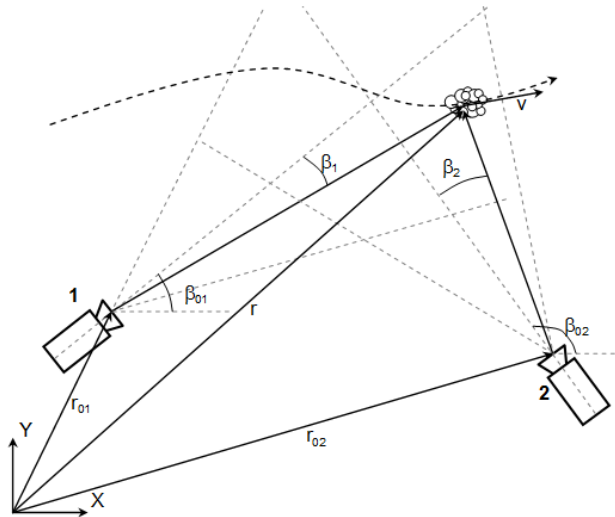


FIGURE 28: PLAN VIEW OF THE SYSTEM TO DETERMINE ELEVATION MEASUREMENT

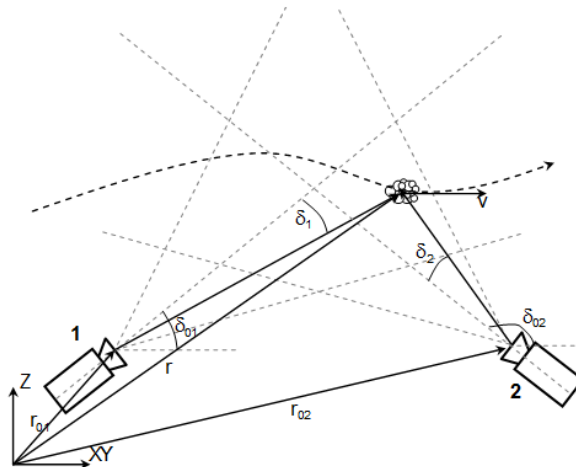


FIGURE 29: ELEVATION VIEW OF THE SYSTEM TO DETERMINE AZIMUT MEASUREMENT

$\beta_i$  and  $\delta_i$  indicate the horizontal and vertical angle between bubble cluster and camera's central axis (Figure 28 and Figure 29). As the camera is not located in the horizontal position,  $\beta_i$  and  $\delta_i$  must be measured in a coordinate system aligned with the camera ( $x', y', z'$ ). Where:

$$\begin{aligned} x' &= x \cos\delta_0 + z \sin\delta_0 \\ y' &= y \\ z' &= -x \sin\delta_0 + z \cos\delta_0 \end{aligned} \tag{67}$$

also:

$$\begin{aligned}\delta'_i &= \arctg(z'/x') \\ \beta'_i &= \arctg(y'/x')\end{aligned}\tag{68}$$

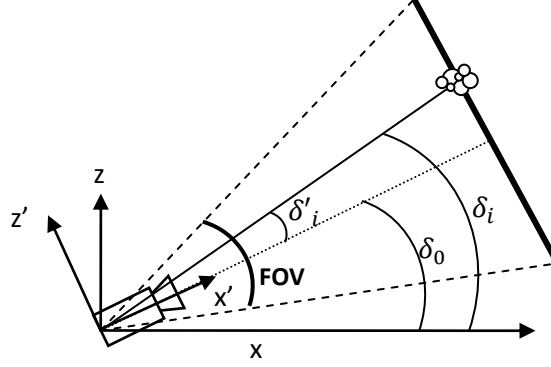


FIGURE 30: CAMERA COORDINATE SYSTEM FOR ELEVATION

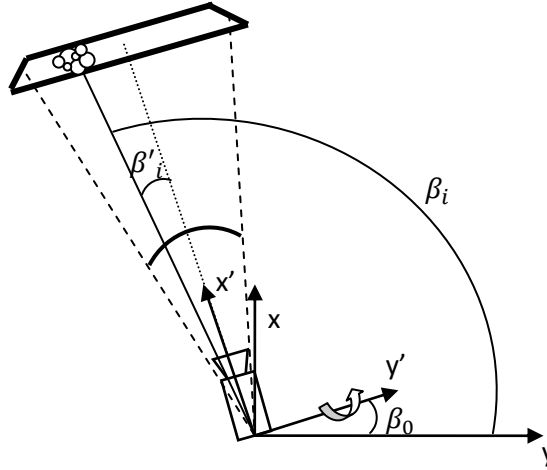


FIGURE 31: CAMERA COORDINATE SYSTEM FOR AZIMUTH

The equations of the model require the angle  $\delta_i$  and  $\beta_i$  between the bubble cluster and the  $x, y, z$  coordinate system. They can be defined as:

$$\delta_i = \delta'_i + \delta_0\tag{69}$$

As the camera is turned in the vertical direction, the elevation angles can be added without taking into account the azimuth.

$$\beta_i = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) + \beta_0 = \arctg\left(\frac{y'}{x' \cos\delta_0 - z' \sin\delta_0}\right) + \beta_0 = \arctg\left(\frac{y'/x'}{\cos\delta_0 - z'/x' \sin\delta_0}\right) + \beta_0$$

$$\beta_i = \arctg\left(\frac{tg\beta'}{\cos\delta_0 - tg\delta'_i \sin\delta_0}\right) + \beta_0\tag{70}$$

Then, the Extended Kalman filter equations can be written as follows (Welch and Bishop TR 95-041, 2002):

**Time update equations (prediction)**

$$\mathbf{x}_{(t+1|t)} = \Phi \cdot \mathbf{x}_t \quad (71)$$

$$P_{(t+1|t)} = \Phi \cdot P_{(t|t)} \cdot \Phi^T + Q_{t+1} \quad (72)$$

**Measurement update equations (correction)**

$$K_{t+1} = P_{(t+1|t)} H_{t+1}^T \cdot (H_{t+1} P_{(t+1|t)} H_{t+1}^T + R_{t+1})^{-1} \quad (73)$$

$$\mathbf{x}_{(t+1|t+1)} = \mathbf{x}_{(t+1|t)} + K_{t+1} [\mathbf{z}_{t+1} - h(\mathbf{x}_{(t+1|t)})] \quad (74)$$

$$P_{(t+1|t+1)} = (I - K_{t+1} H_{t+1}) P_{(t+1|t)} \quad (75)$$

Note that in the time update equations, the current state and error covariance estimations are projected forward by means of a linear relation, but not in the measurement update equations, because the measurement relationship to the process is non-linear.

Filter initialization requires an initial value for the state vector  $\mathbf{x}$  and error covariance matrix  $P$ . Initial position values for bubble cluster can be easily calculated by triangulating known camera and bubble generator positions. Its initial velocity can be considered zero or, if there are previous recorded wind speed values, they can be used as useful initial values.

**4.2.2. COVARIANCE MATRICES  $P_0$ ,  $Q$  AND  $R$**

Determining  $P_0$ ,  $Q$  and  $R$  values is a critical task to achieve an accurate and reliable filter performance and then avoid diverging.

Error covariance matrix  $P_0$ : Initial bubble cluster positions are well known, so its corresponding covariance errors ( $P_{1,1}, P_{2,2}, P_{3,3}$ ) are 0. On the other hand, initial speed values are unknown, its corresponding initial covariance errors ( $P_{4,4}, P_{5,5}, P_{6,6}$ ) have a high value, this way filter can quickly correct speed values. Also,  $a_z$  covariance error  $P_{7,7}$  has a high value for the same reason.

$$P_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{4,4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{5,5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{6,6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{7,7} \end{bmatrix} \quad (76)$$

Process noise  $Q$ : Exist deviations from simplified lineal model because  $a_z$ ,  $v_x$  and  $v_y$  are considered as a constant during small time steps, so  $Q$  is very similar to that in reference (Grewal and Andrews 2008) used in moving target tracking.

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{4,4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{5,5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{7,7} \end{bmatrix} \quad (77)$$

Measurement error covariance matrix  $R$ : It is defined by sensor variance  $\sigma^2$  (Grewal and Andrews 2008). In this system variance meanly depends on tracking camera angular resolution, for example, the camera used for testing has 0,0006 rad and 0,00059 rad for vertical and horizontal angular resolution. Therefore, if it is possible to identify bubble cluster in the pictures with enough accuracy, the maximum error will be one pixel, which corresponds with 0,0006 rad or 0,00059 rad.

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_h^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_v^2 \end{bmatrix} \quad (78)$$

### 4.3. NUMERICAL RESULTS

In order to validate the wind speed profile measurement system and probe its feasibility, a computer model is created. First, system model is created with three mean elements:

- Bubbles model: Here, bubbles movement through the atmosphere is simulated. The model has been created with a random number source as forces acting over a very light body. This model is known as white noise acceleration model, its major advantage is simplicity and it is used when target maneuvers are small and random (Rong Li and Jilkov April 2000). Movement equations allow to obtain target positions and velocity at any time. Target position is the subsystem output.
- Angle measurement: It uses target position and measurement function to obtain angle measurements with its corresponding noise.
- Measurements Processing: In this subsystem the EKF code is implemented to obtain bubbles position and speed from measurements.

#### 4.3.1. NUMERICAL TESTING OF THE WIND SPEED PROFILE MEASUREMENT SYSTEM

Filter performance must be carefully analyzed with computer simulations. During these simulations two parameters are used as a constant: measurement error covariance matrix  $R$  and the bubble generator and camera position.

- Camera 1:  $x = 200 \text{ m}$   $y = 0$   $z = 0$
- Camera 2:  $x = 0$   $y = 200 \text{ m}$   $z = 0$
- Bubble generator:  $x = 300 \text{ m}$   $y = 300 \text{ m}$   $z = 0$

Usually, in bibliography, filter performance is evaluated using the elements of the error covariance matrix  $P$  (Jwo and Cho 2007) (Grewal and Andrews 2008). When several similar variables must be analyzed at the same time, it is a usual practice to calculate the Root Mean Square (RMS) value of the corresponding matrix elements (Angelova and Mihaylova 2006).

Several simulations have been conducted in order to validate system performance for different wind speed profiles. In the next three scenarios a  $1/3$  second time step was used between consecutives measurements and the simulations were 35 seconds long, also the initial acceleration value was considered  $0,5 \text{ m/s}^2$ .

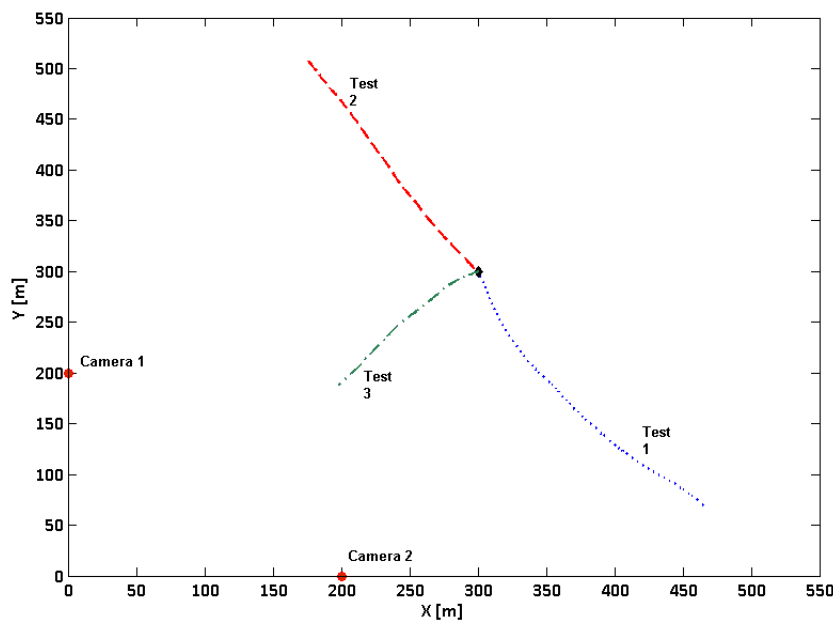


FIGURE 32: PLAN VIEW OF THE PATH OF TARJETS IN THE THREE COMPUTER SIMULATIONS



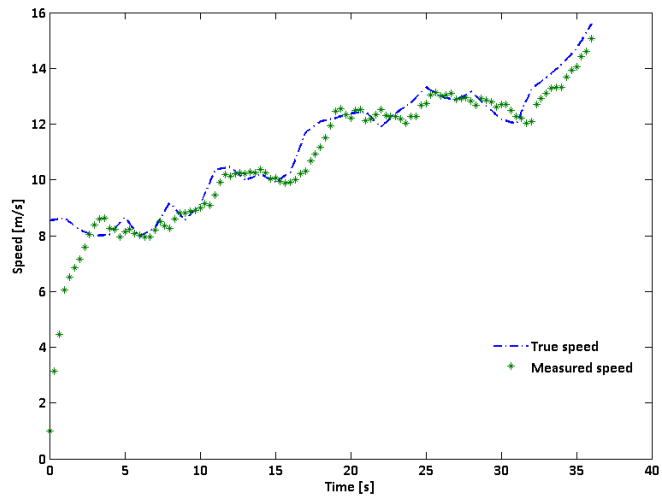


FIGURE 33: TRUE SPEED AND MEASURED SPEED DURING SIMULATION TEST 1

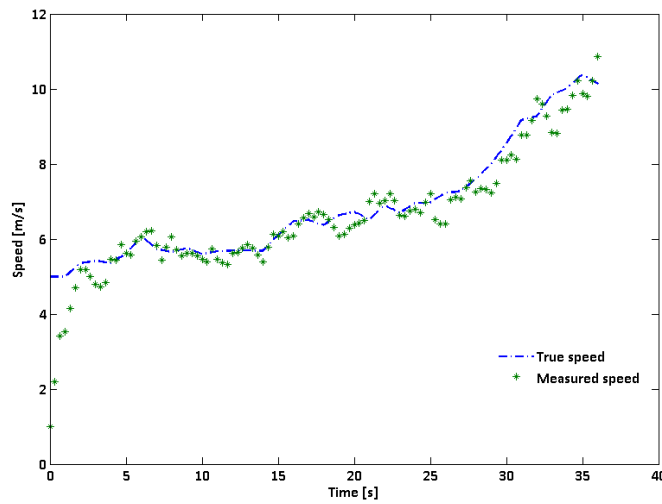


FIGURE 34 TRUE SPEED AND MEASURED SPEED DURING SIMULATION TEST 2

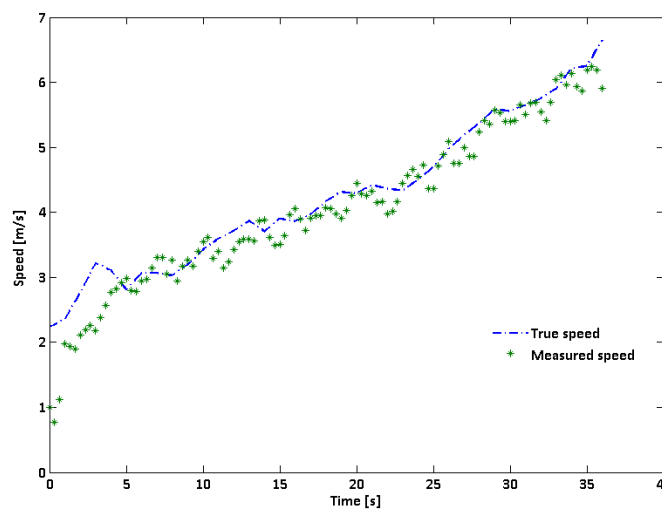


FIGURE 35 TRUE SPEED AND MEASURED SPEED DURING SIMULATION TEST 3

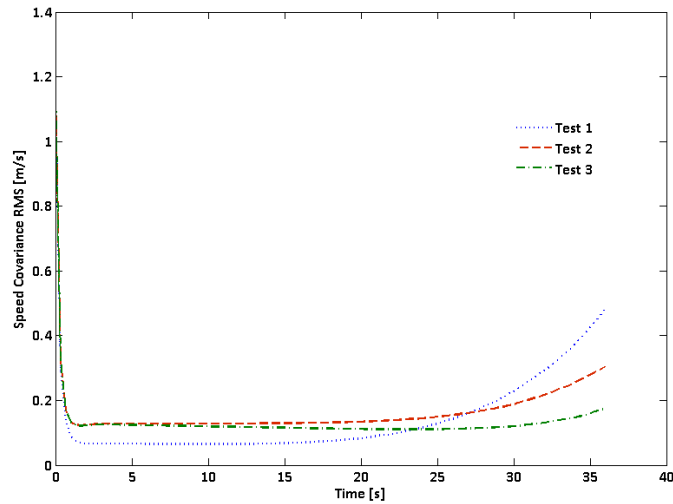


FIGURE 36: SPEED COVARIANCE (RMS VALUES) OBTAINED FROM SPEED ELEMENTS IN COVARIANCE MATRIX P

Filter performance is good enough in the three simulated scenarios and its results have a really small estimated error. Covariance matrix elements grow quickly in test 1 because during the simulation the target moves far away from the cameras, so system accuracy decrease; in test 2 covariance grows too, but no so quickly because target speed is smaller, so the target remains closer to the cameras. In test 3 the target approaches to the cameras, so the system resolution and accuracy remain high. In any way, values of the velocity error covariance elements are always small enough, however system performance can be improved just by using more cameras in different locations.

Also, the allowable time steps between two consecutives measurements must be checked. Three tests have been conducted for the same wind speed profile:

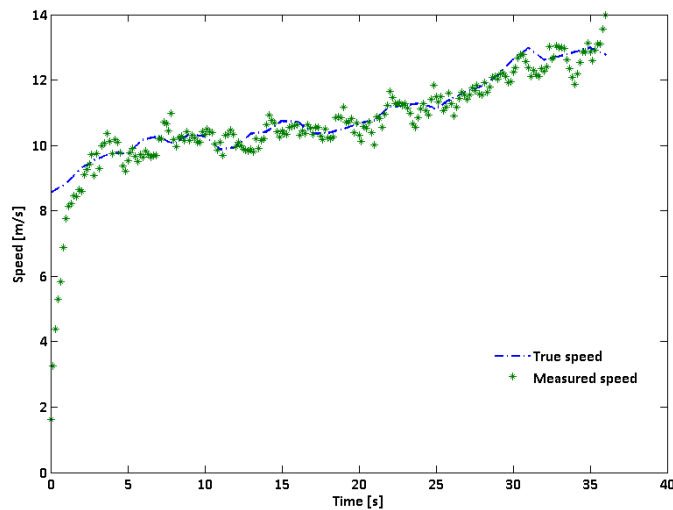


FIGURE 37: TRUE SPEED AND MEASURED SPEED DURING TEST 4; 1/6 SECONDS TIME STEP

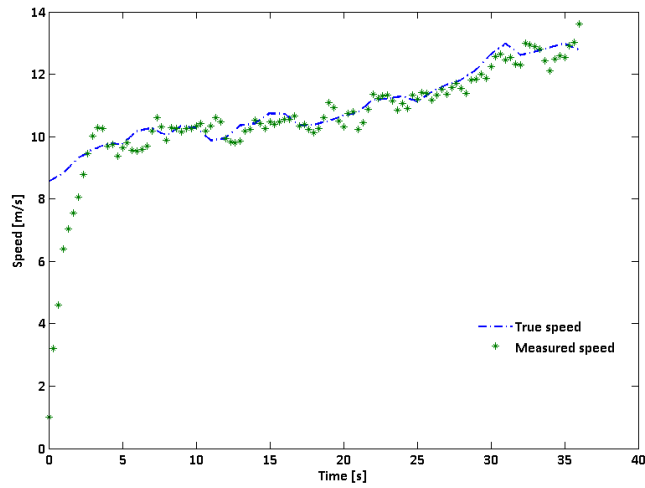


FIGURE 38: TRUE SPEED AND MEASURED SPEED DURING TEST 5; 1/3 SECONDS TIME STEP

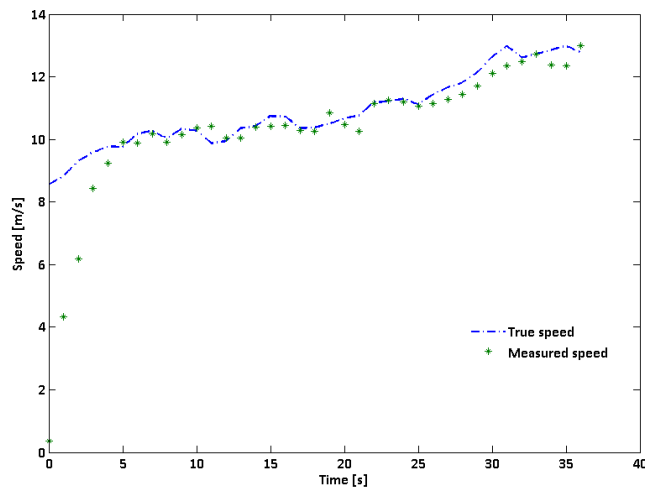


FIGURE 39: TRUE SPEED AND MEASURED SPEED DURING TEST 4; 1 SECONDS TIME STEP

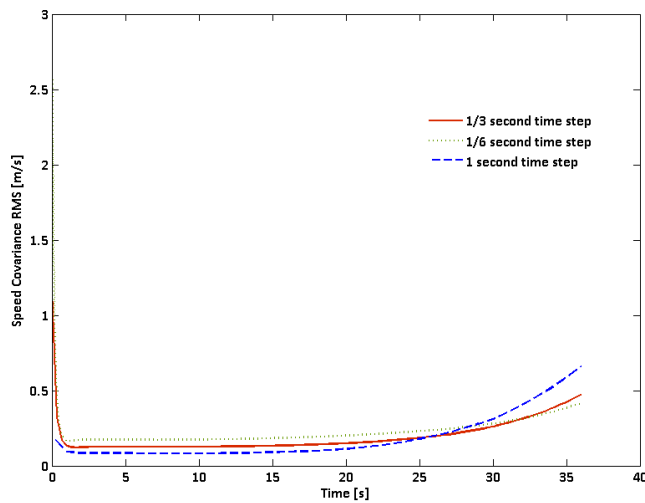


FIGURE 40: SPEED COVARIANCE (RMS VALUES) OBTAINED FROM SPEED ELEMENTS IN COVARIANCE MATRIX P DURING THE DIFFERENT TIME STEP TESTS

Again, the value of the velocity error covariance elements are really small in the three cases; obviously if the time step is smaller, the error will be smaller too and a more detailed speed profile is obtained. A two seconds time step looks right but, if the wind speed changes quickly, a higher measurement frequency will be necessary.

#### 4.4. FIELD MEASUREMENTS

System accuracy must be confirmed in the same way that other systems were tested, like Doppler sodars (Vogt and Thomas 1995) and others.

##### 4.4.1. INITIAL VALIDATION TESTS

Several initial tests were conducted in León, northwest of Spain, in a near urban area. A prototype measurement system was developed and deployed in order to obtain enough measurements of wind velocities at different altitudes and then compare them with those obtained by a sonic anemometer 6 m above the ground and extrapolated with the exponential equation (33), this test is quite similar to others referred in (Tamura, et al. 2007).

Several experiments had to be conducted in order to test the measurement system in different conditions.

Initially, small balloons were used as targets instead of bubbles because of its easiest logistic requirements; also, the cameras were located about 60 meters away of the launch pad. Two experiments were carried out, in the first one, wind speed was really low and so system performance could be evaluated in such conditions. Results are displayed in Figure 41 and Figure 42: in the first one all the individual measurements collected during the test are showed, in the second one mean value is calculated for each two meter height segment.

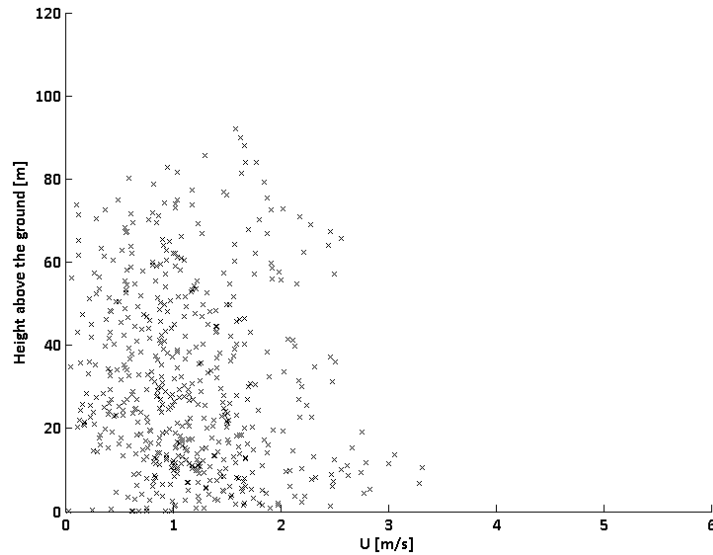


FIGURE 41: WIND SPEED MEASURED AT VARIOUS LEVELS

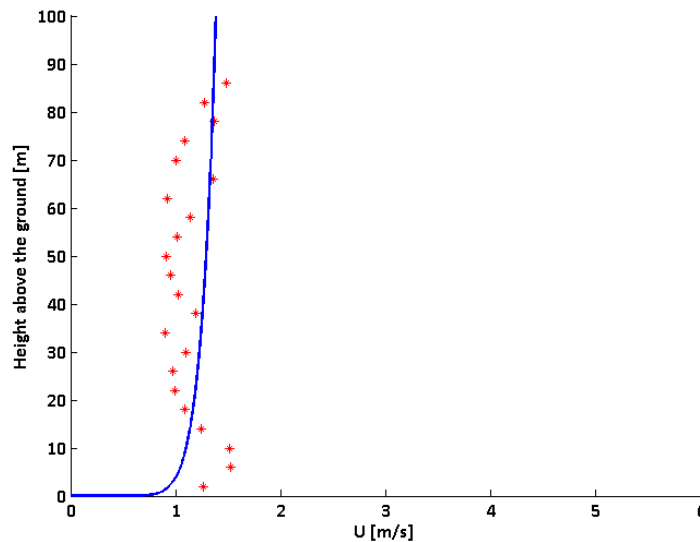


FIGURE 42: CROSES, PROFILE OF 10 MINUTES MEAN WIND SPEED MEASURED DURING THE FIELD TESTS. SOLID LINE, EXTRAPOLATED VALUES OF THE ULTRASONIC ANEMOMETER MEASUREMENT

In this case wind velocity was too low, for this reason it is quite difficult to identify any developed profile. Anyway, this experiment will allow to confirm system performance in a large range of situations.

Another experiment was conducted in windier conditions. The same prototype measurement system was deployed to the same location in order to obtain the wind speed profile. All the measurements (543) employed to obtain the averaged data values are represented in figure Figure 43 and the averaged speed profile is plotted in Figure 44. The extrapolated values of the power law are also plotted in this figure with solid line. The least squares method has been used to calculate  $\alpha$ , the index of the power law, which value was 0.29, quite similar to those proposed in (Tamura, et al. 1999) for a near urban area.

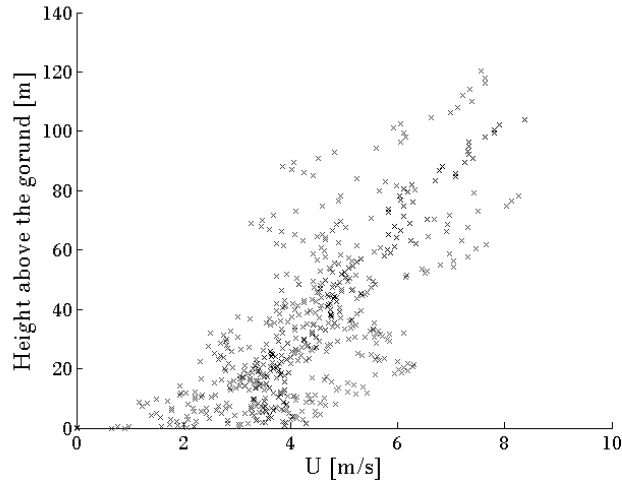


FIGURE 43: WIND SPEED MEASURED AT VARIOUS LEVELS

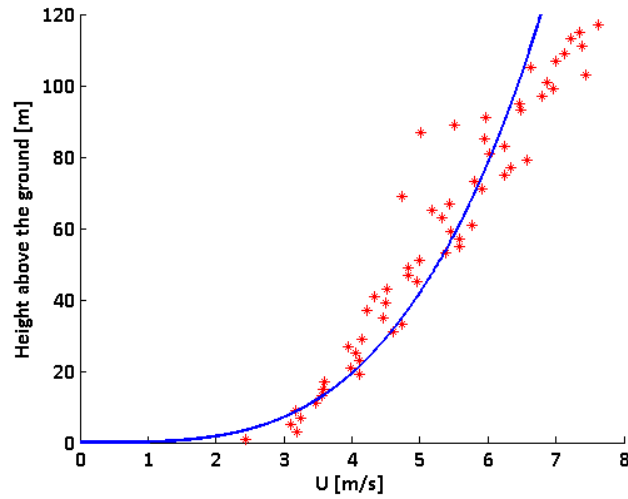


FIGURE 44: CROSES, PROFILE OF 10 MINUTES MEAN WIND SPEED MEASURED DURING THE FIELD TESTS. SOLID LINE, EXTRAPOLATED VALUES OF THE ULTRASONIC ANEMOMETER MEASUREMENT

Several target launches were necessary to obtain enough measurements with adequate time spread, speed measurement profile for each launch is plotted in Figure 45.

#### 4. Wind field measurement method based on free bubble tracking

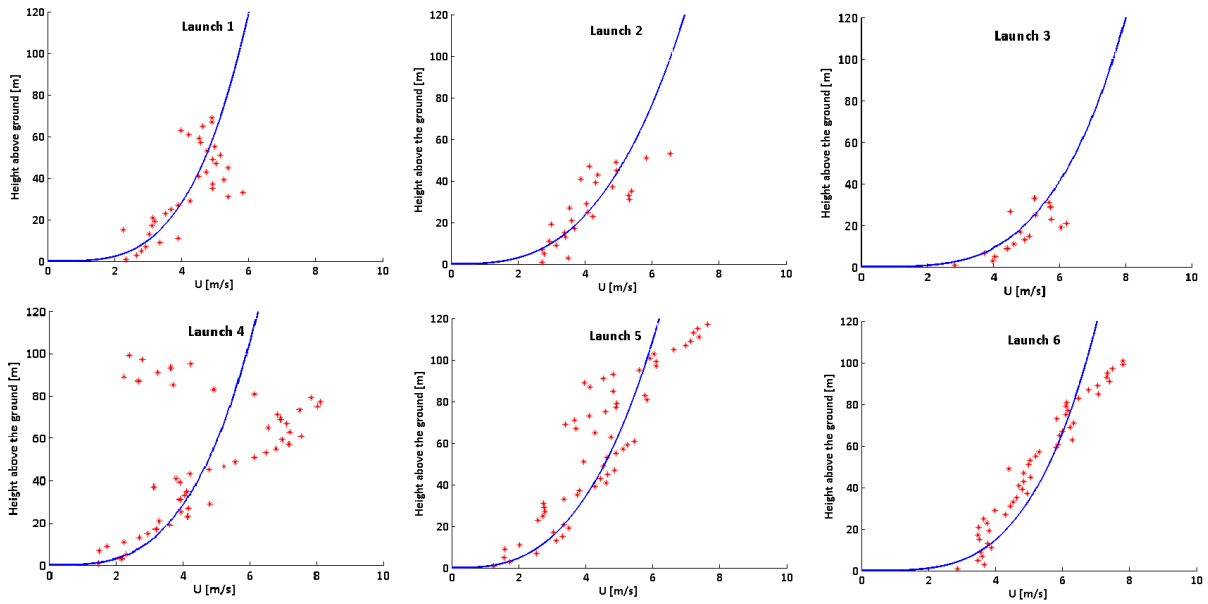


FIGURE 45: SPEED MEASUREMENT PROFILE OBTAINED FOR EACH TARGET LAUNCH

System measurements comply quite well with the predicted power law values (Figure 44).

#### 4.4.2. SYSTEM TESTS IN THE AIRPORT

Validation tests were conducted in an airfield of the Spanish Air Force located in *La Virgen del Camino – León*. The test place is located near the runway and the surroundings are a very low roughness terrain.



FIGURE 46 WIND PROFILER TEST LOCATION

The deployed equipment can be observed in Figure 49.

#### 4. Wind field measurement method based on free bubble tracking

---

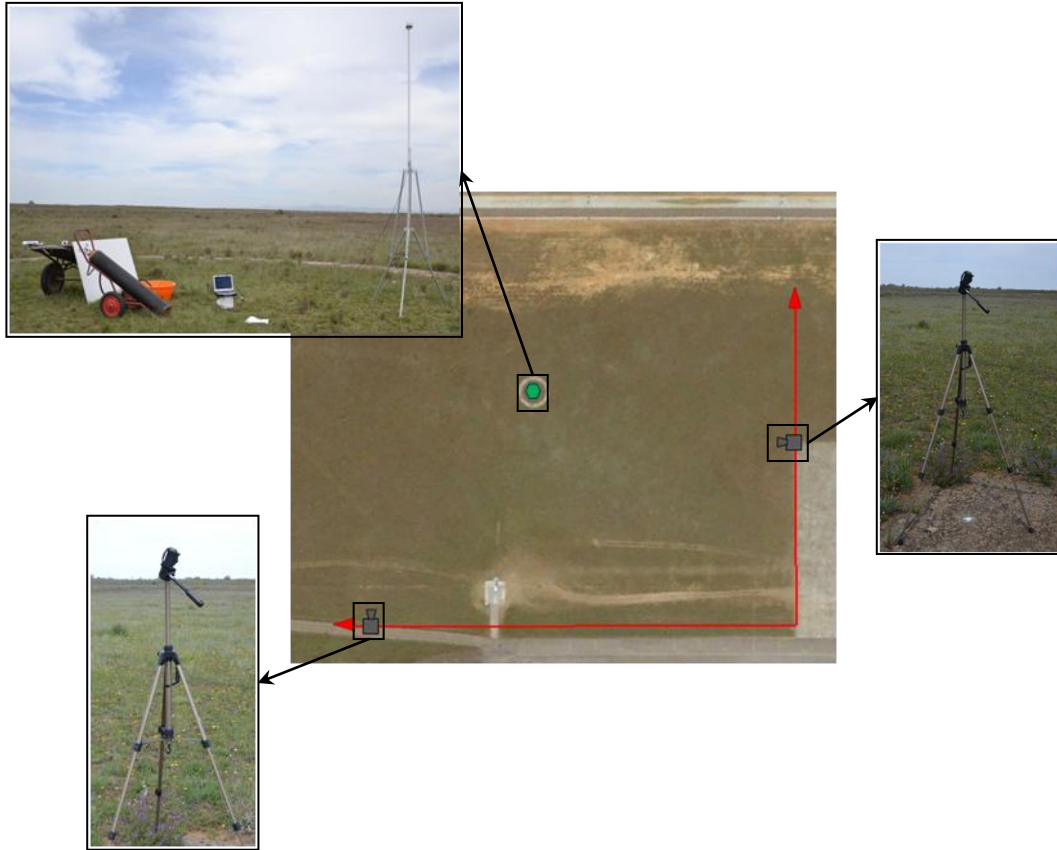


FIGURE 48: DEPLOYED EQUIPMENT FOR THE VALIDATION TESTS

The equipment consists of two standard photographic cameras (Figure 50), helium bottle, computer and an ultrasonic anemometer (Figure 51) with its own support structure.



FIGURE 50: CANON POWERSHOT SX110 IS DIGITAL CAMERA USED DURING THE TESTS



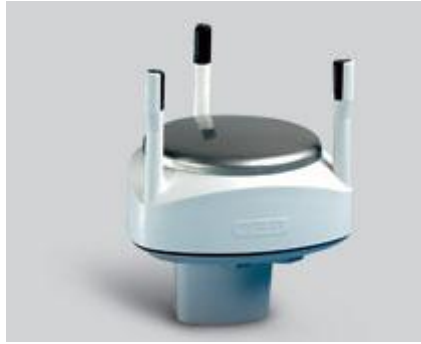


FIGURE 51: VAISALA WINDCAP® ULTRASONIC WIND SENSOR WMT52

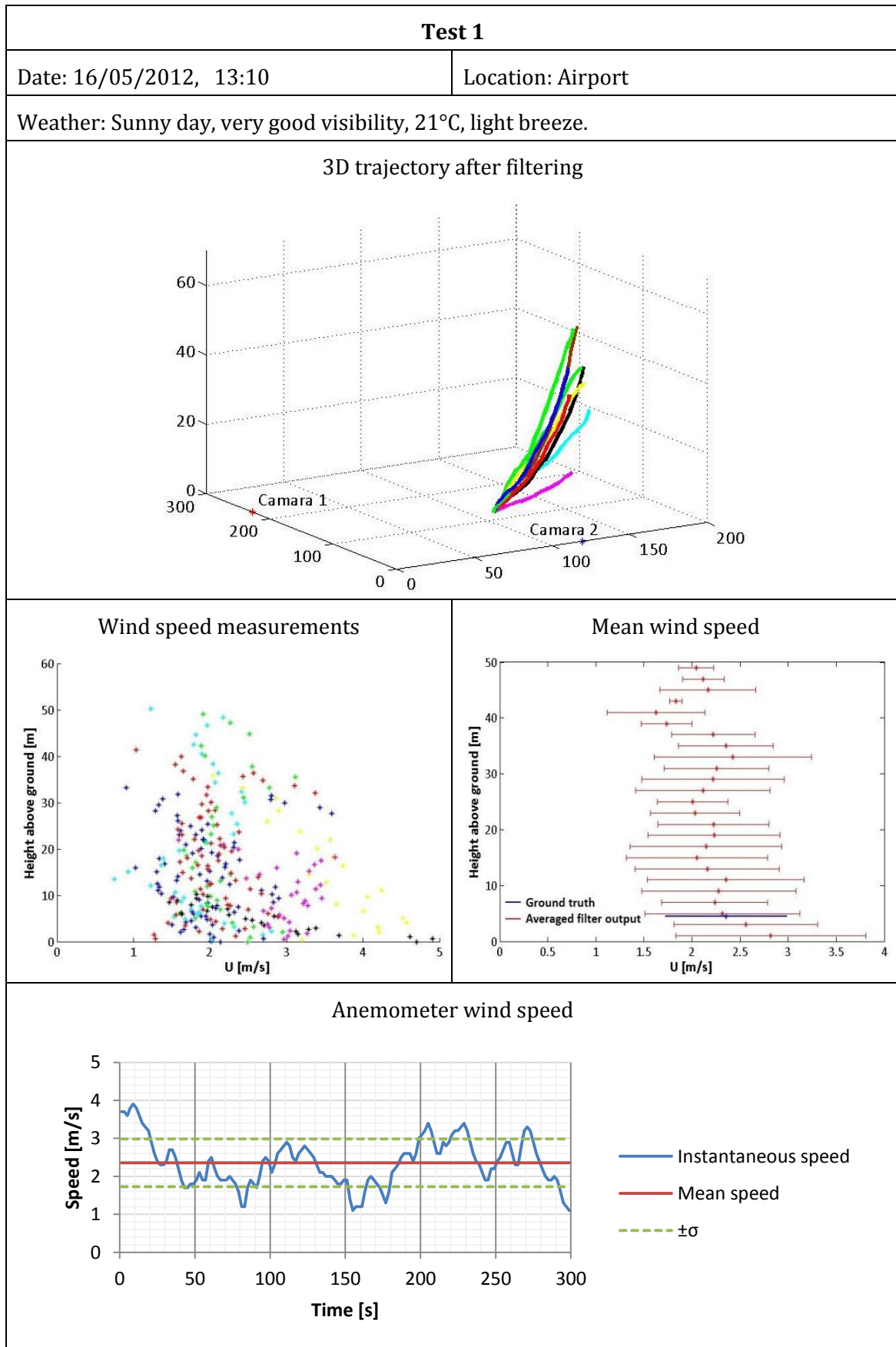
This equipment allows to generate and track big bubble clusters that can be easily identified in the photographs taken at a distance bigger than 200 meters. This can be confirmed on Figure 52:



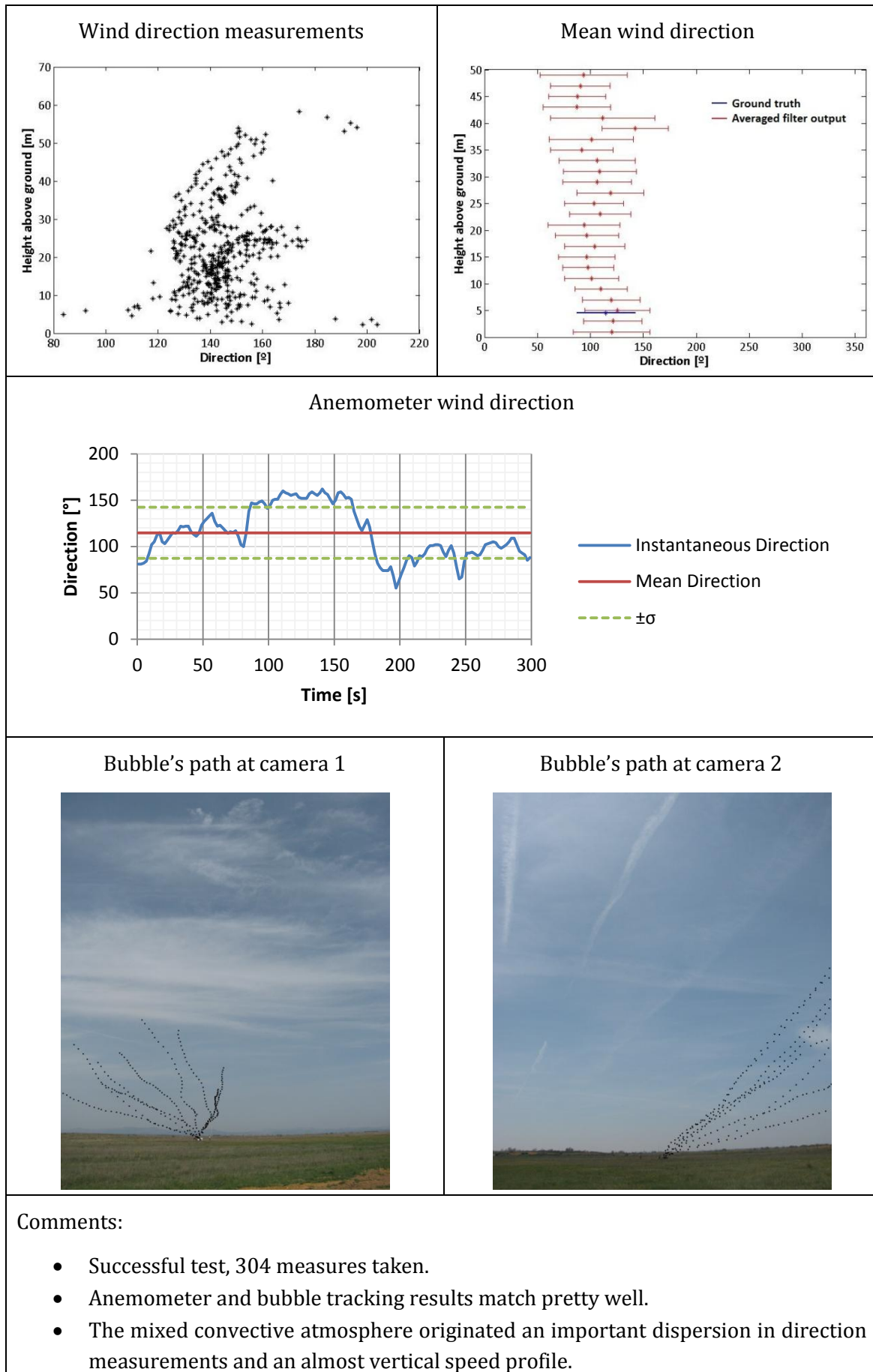
FIGURE 52: AN EXAMPLE OF BUBBLE CLUSTERS IDENTIFIED IN A PHOTOGRAPH

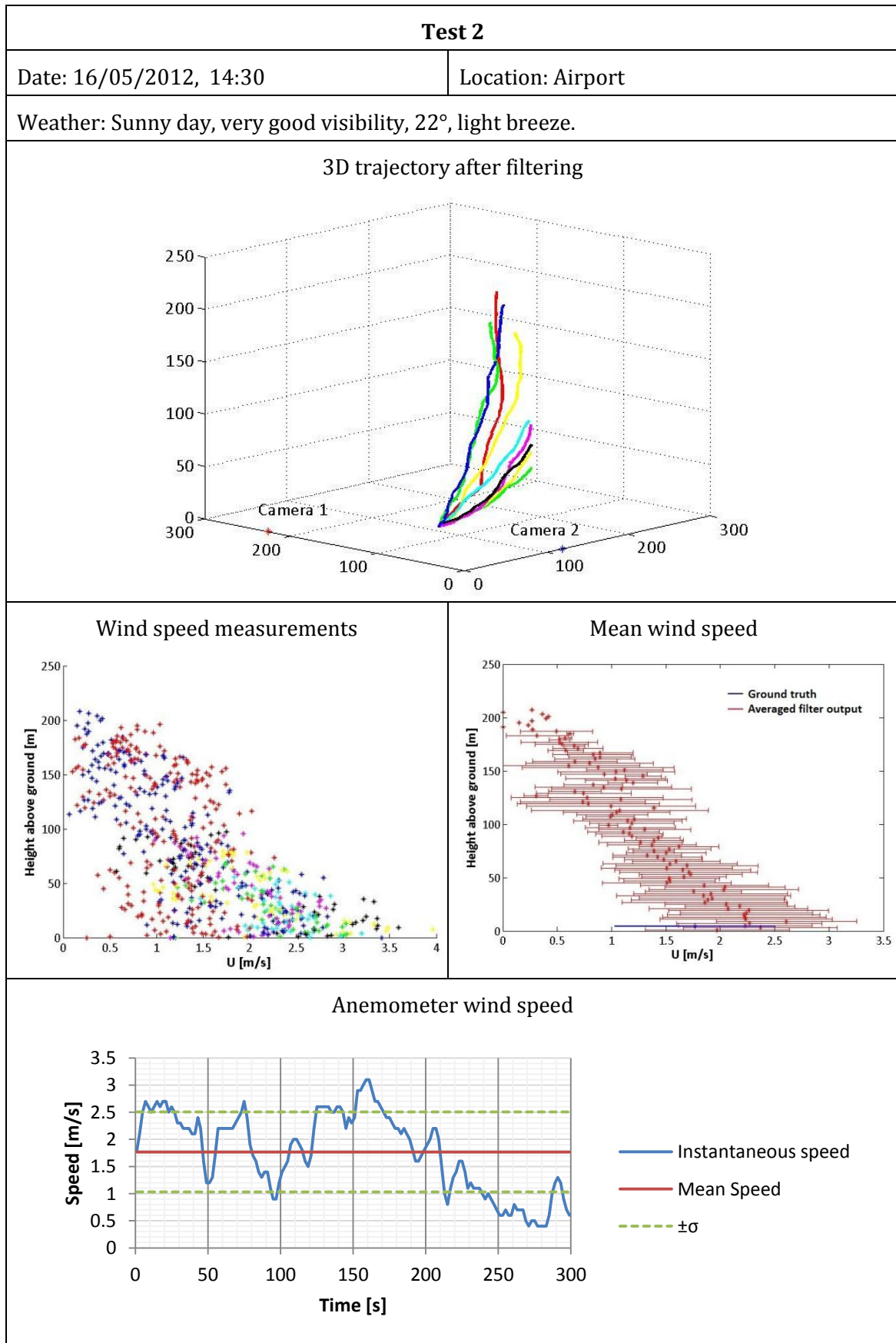
The test campaign was designed in such way that the system was validated for different atmospheric conditions, for example wind conditions vary quite a lot during a sunny day, as sun heats the terrain surface and buoyancy effect have a great influence in the planetary boundary layer.

All data collected during the test campaign is now displayed. The system can provide wind speed and direction data that can be compared with the ground truth. All these information were obtained with the Kalman Filter from the angle measurements and they were calculated from the bubble cluster locations in the photographs. These locations in the photos are put together in one single photograph for each test. Further, the results provided by the anemometer are also showed. Also, the three dimensional trajectory of the bubbles can be reconstructed thanks to the position values obtained with the Kalman Filter and plotted in a 3D visualization.

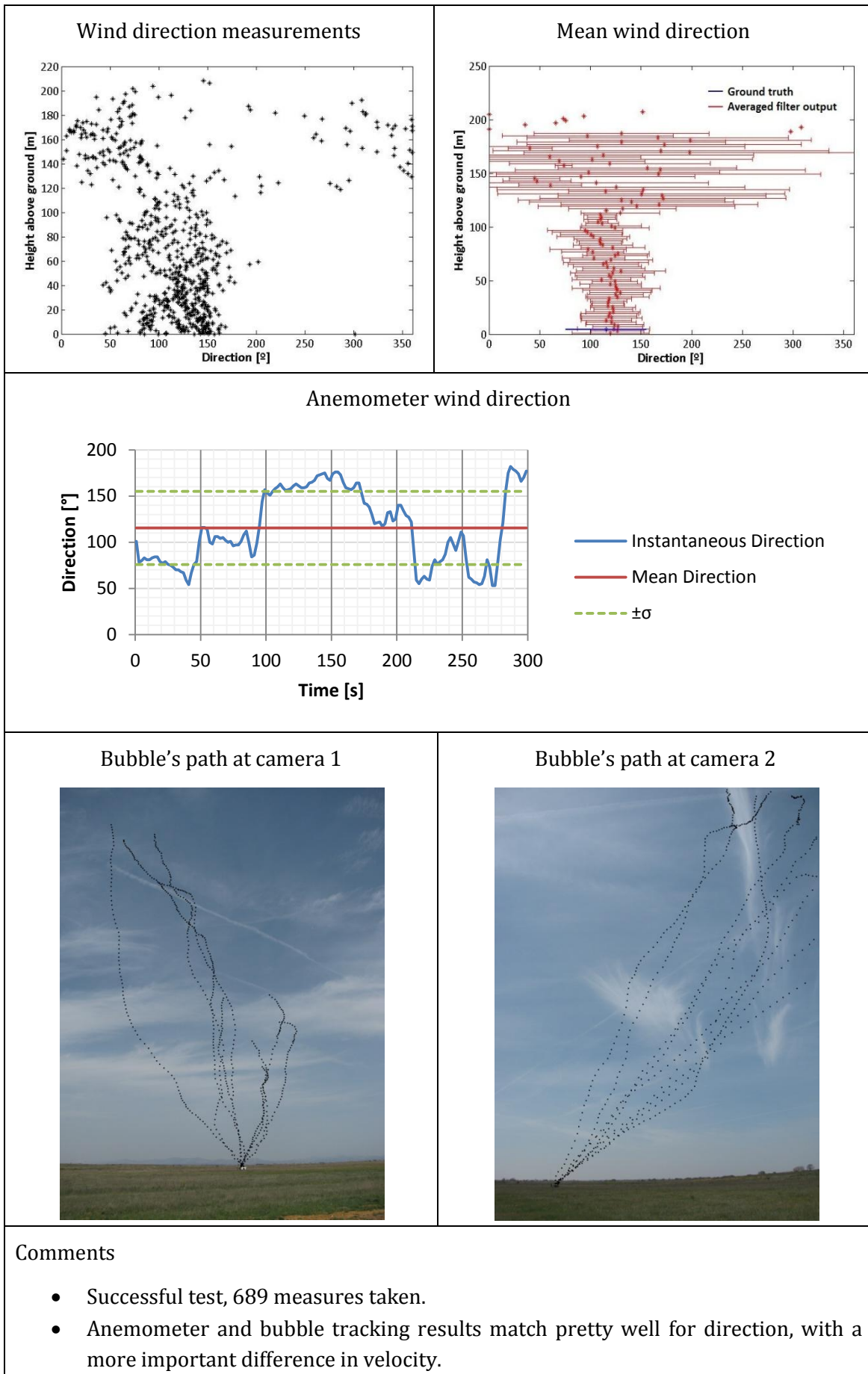


#### 4. Wind field measurement method based on free bubble tracking





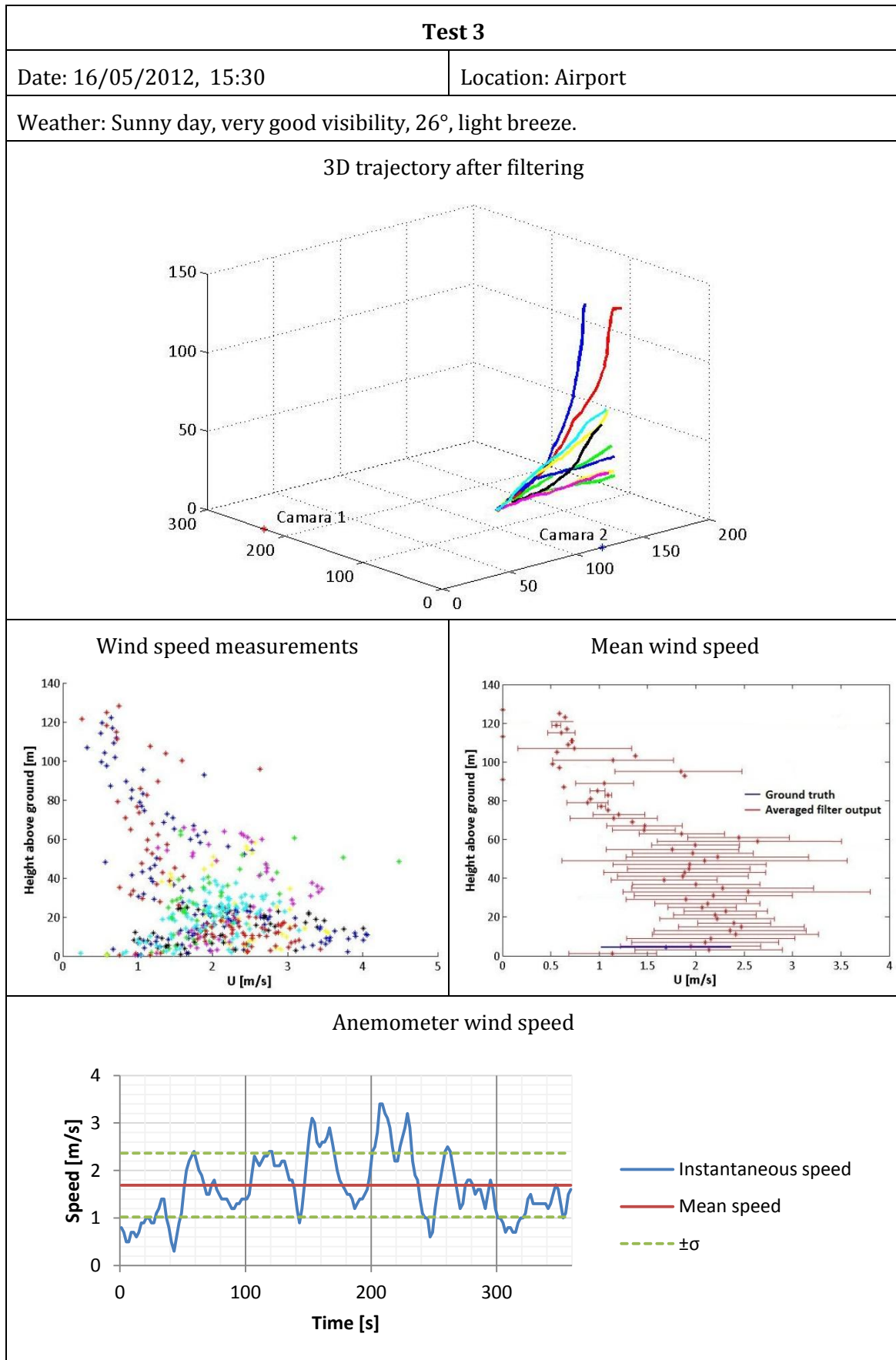
#### 4. Wind field measurement method based on free bubble tracking



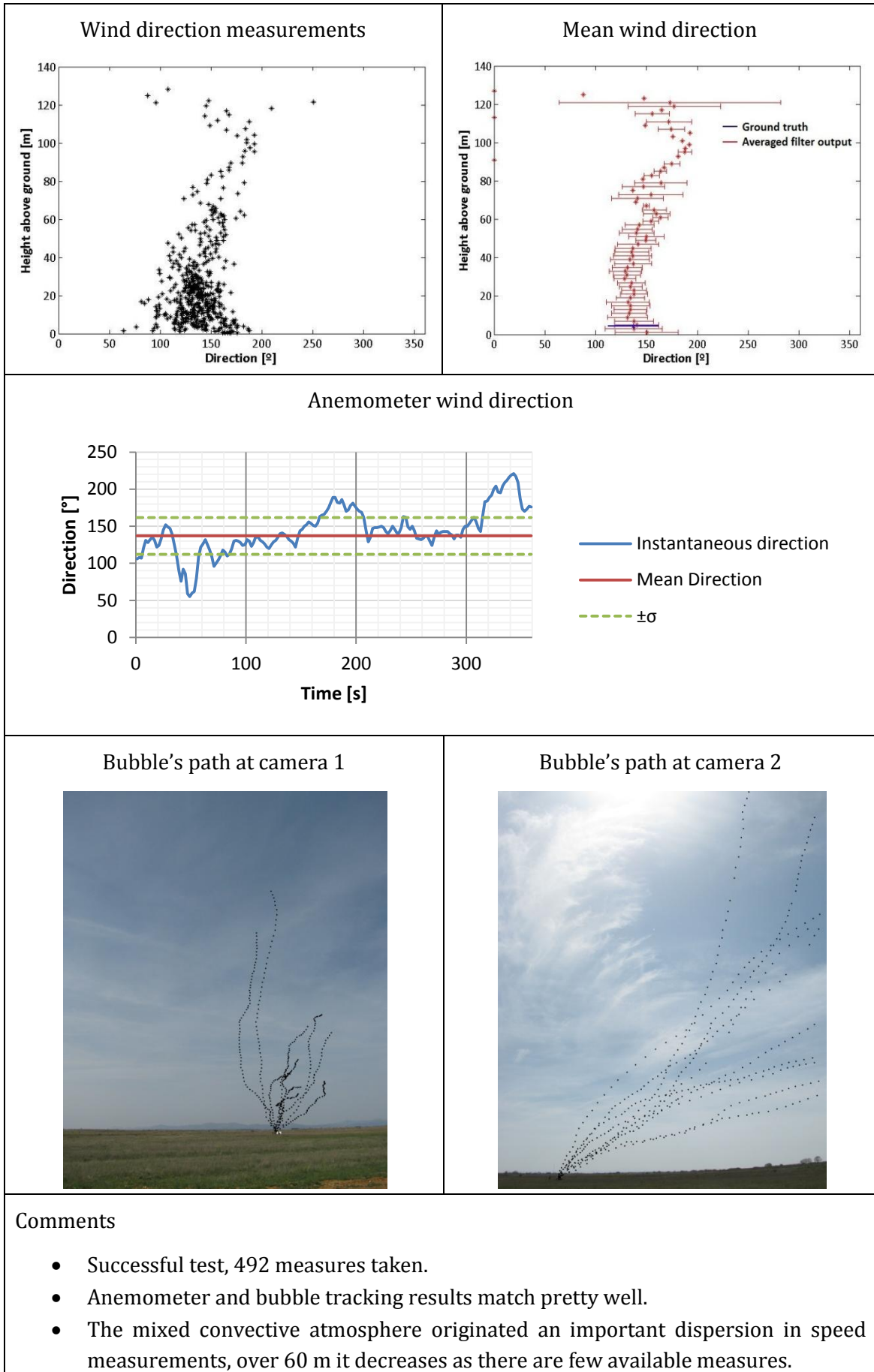
- Uncommon profiles for direction and speed. It is considered that bubble clusters got in a strong vertical convective flow due to overheat of the runway. Also a great spread in direction and speed measurements can be observed over 100m height, when horizontal speed is almost zero.



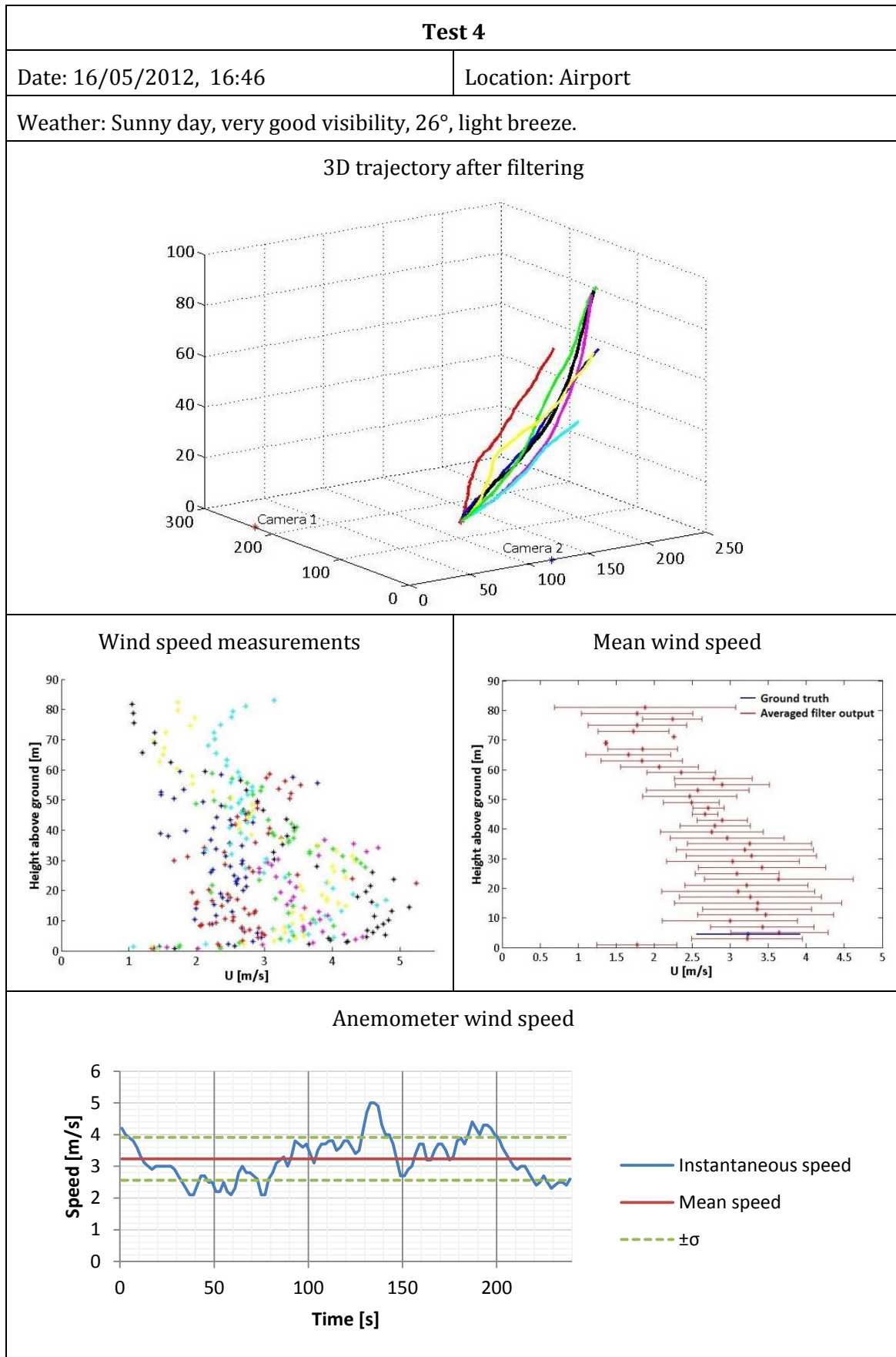
#### 4. Wind field measurement method based on free bubble tracking

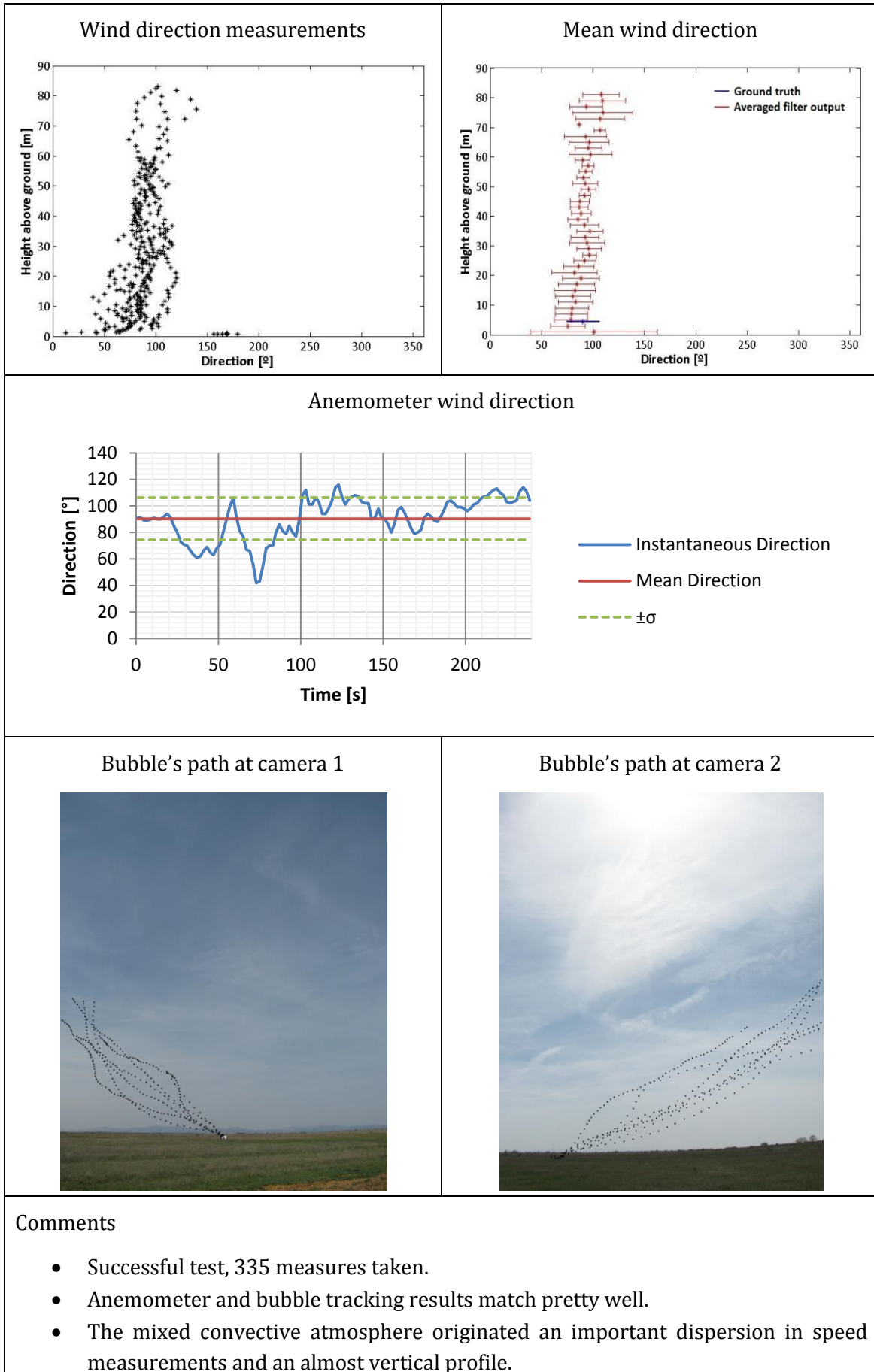




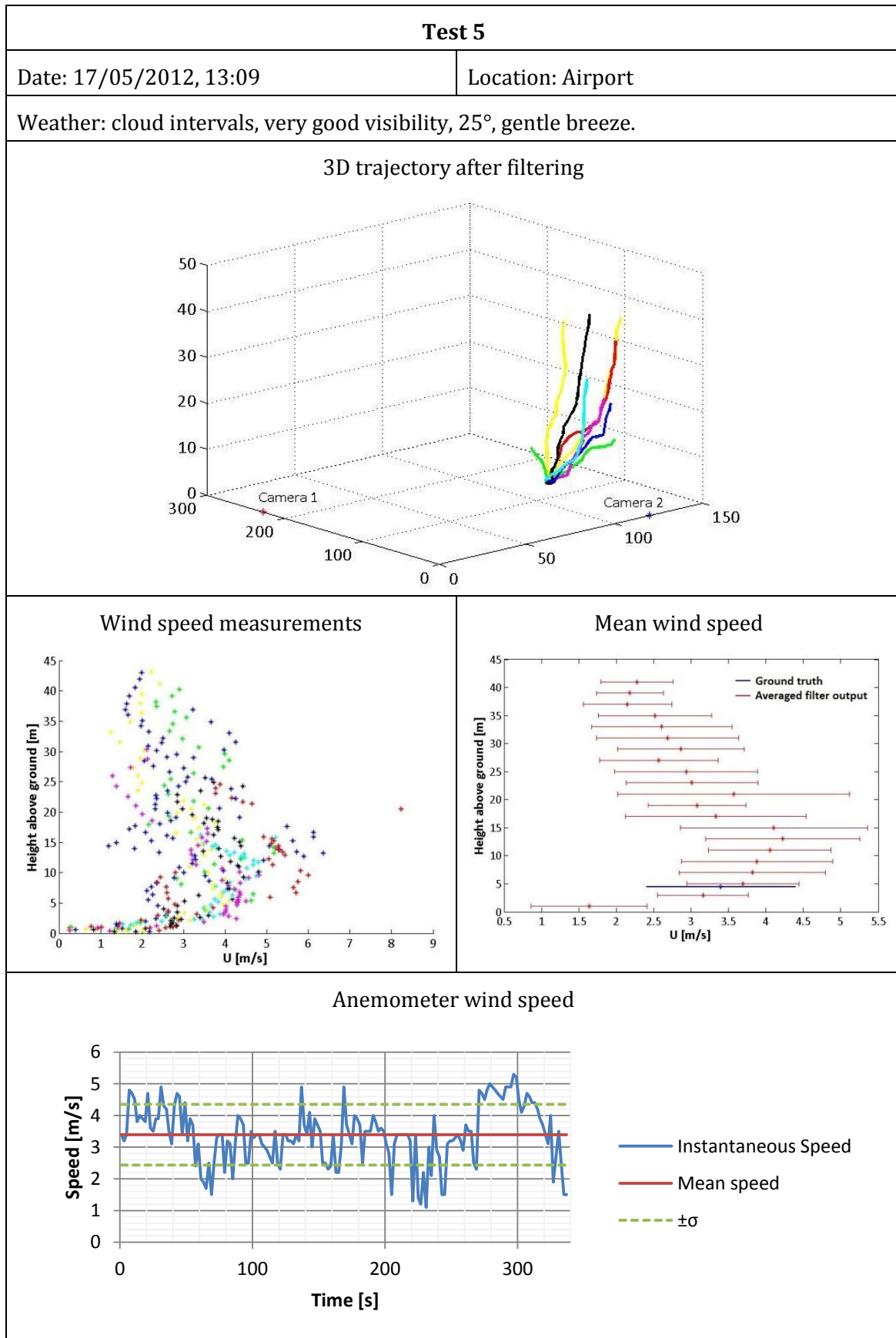


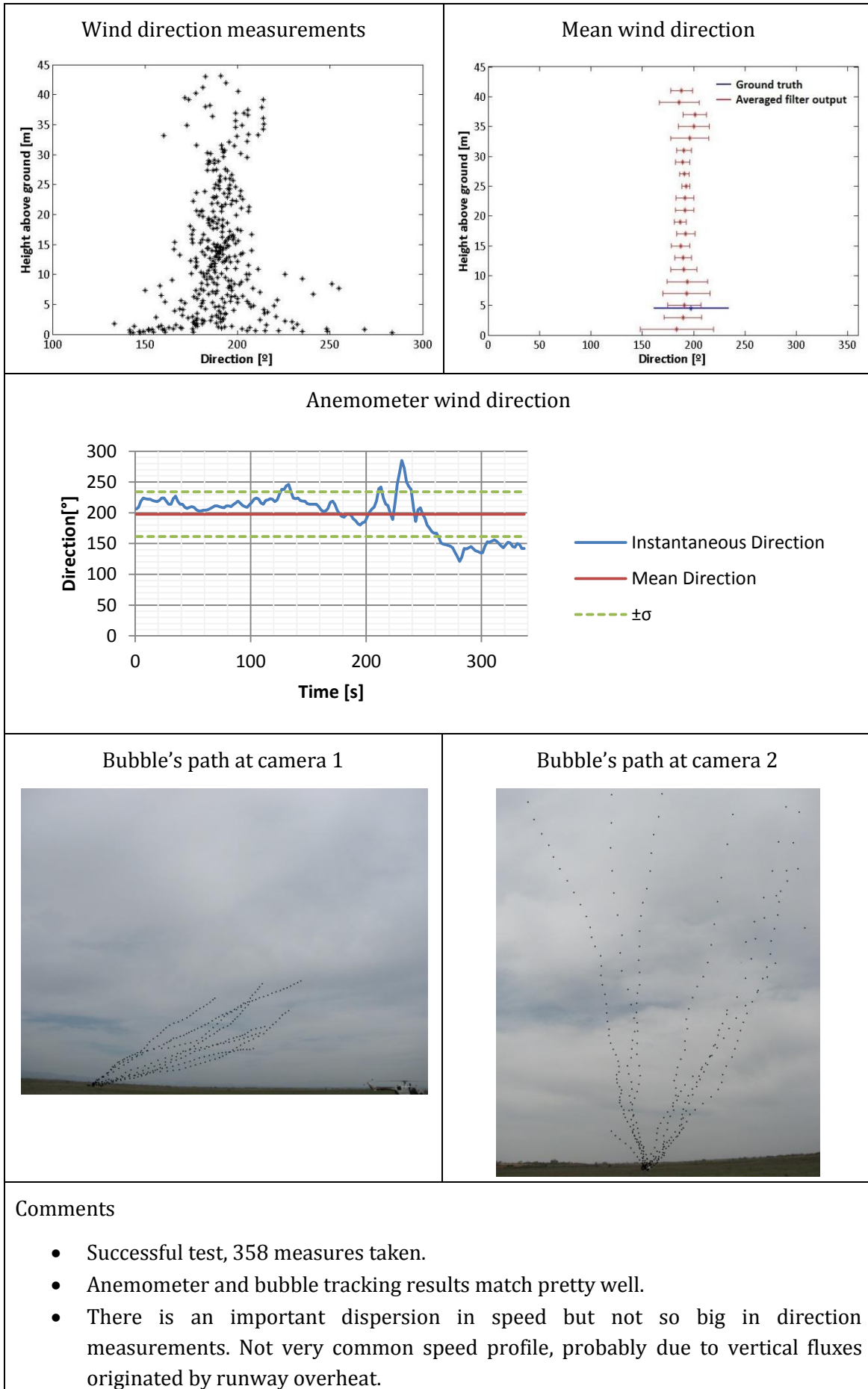
#### 4. Wind field measurement method based on free bubble tracking



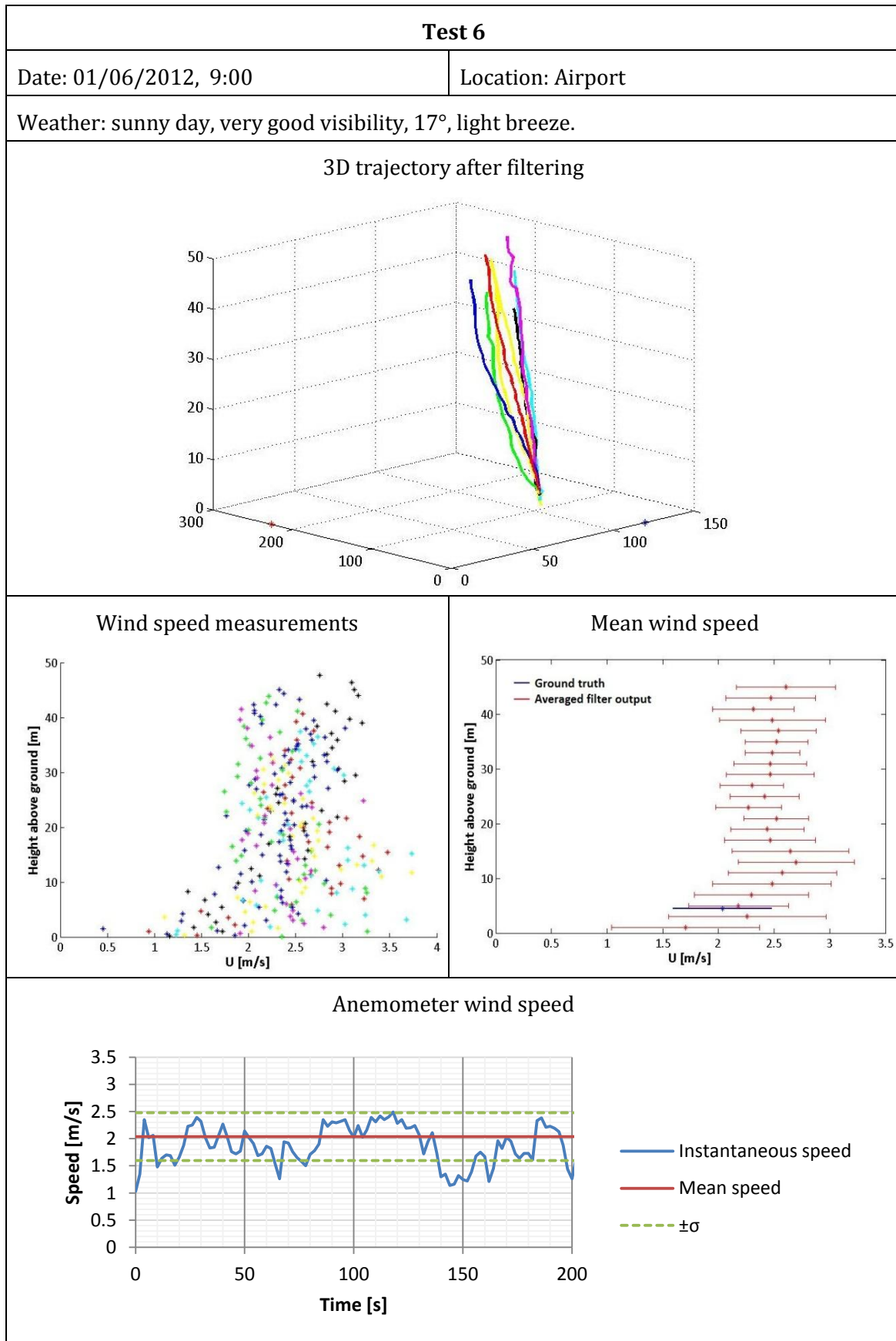


#### 4. Wind field measurement method based on free bubble tracking



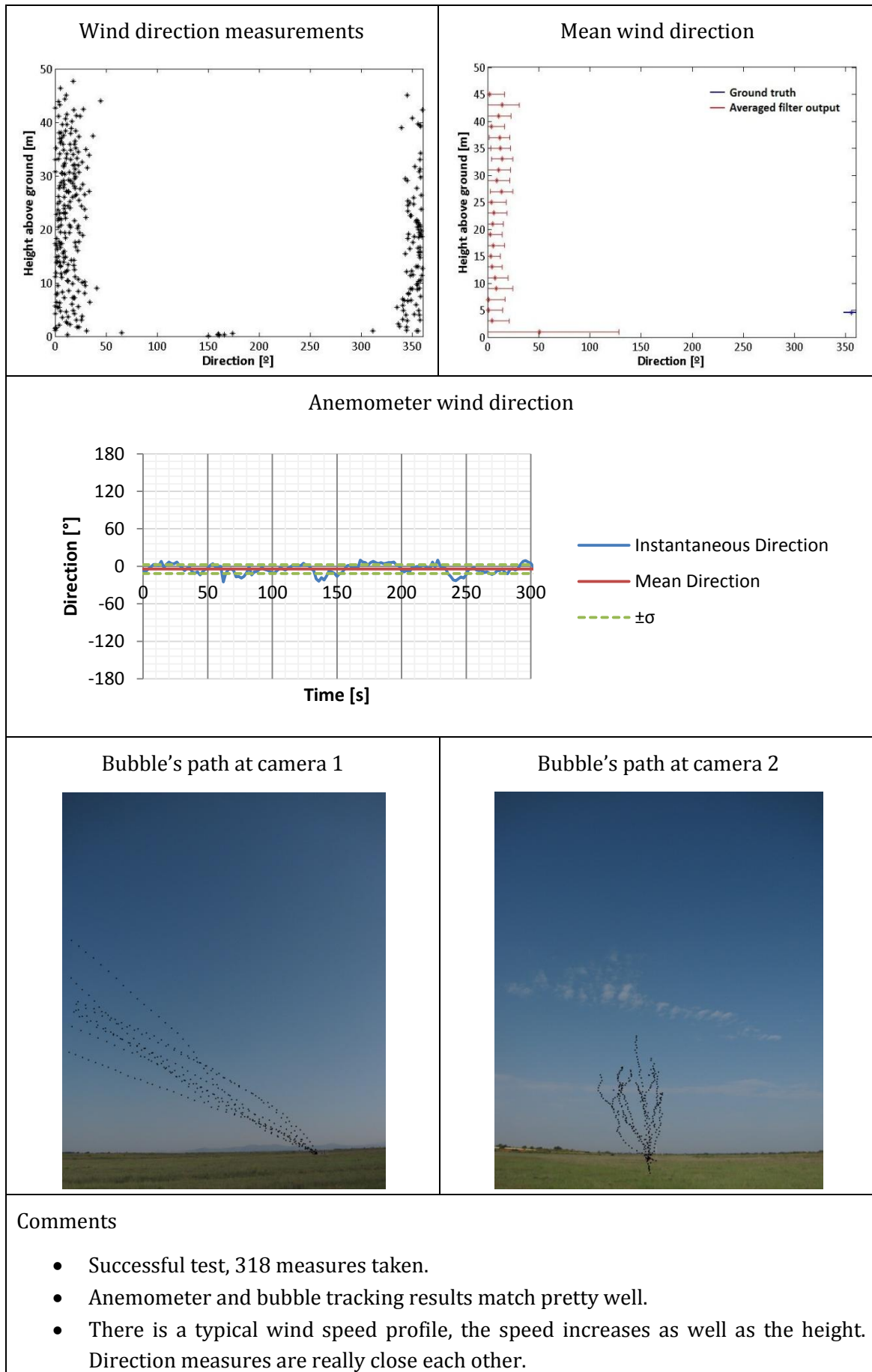


#### 4. Wind field measurement method based on free bubble tracking

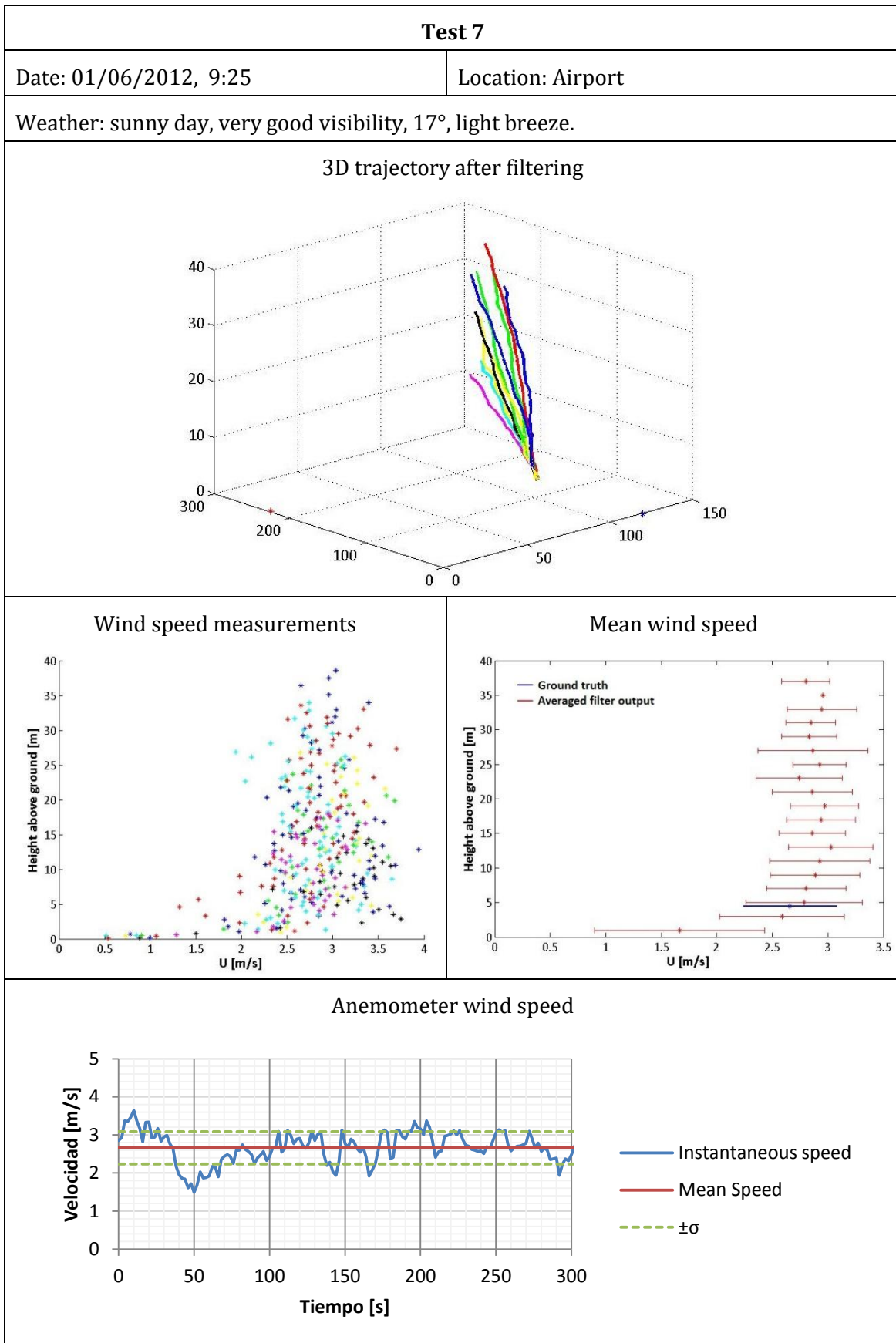




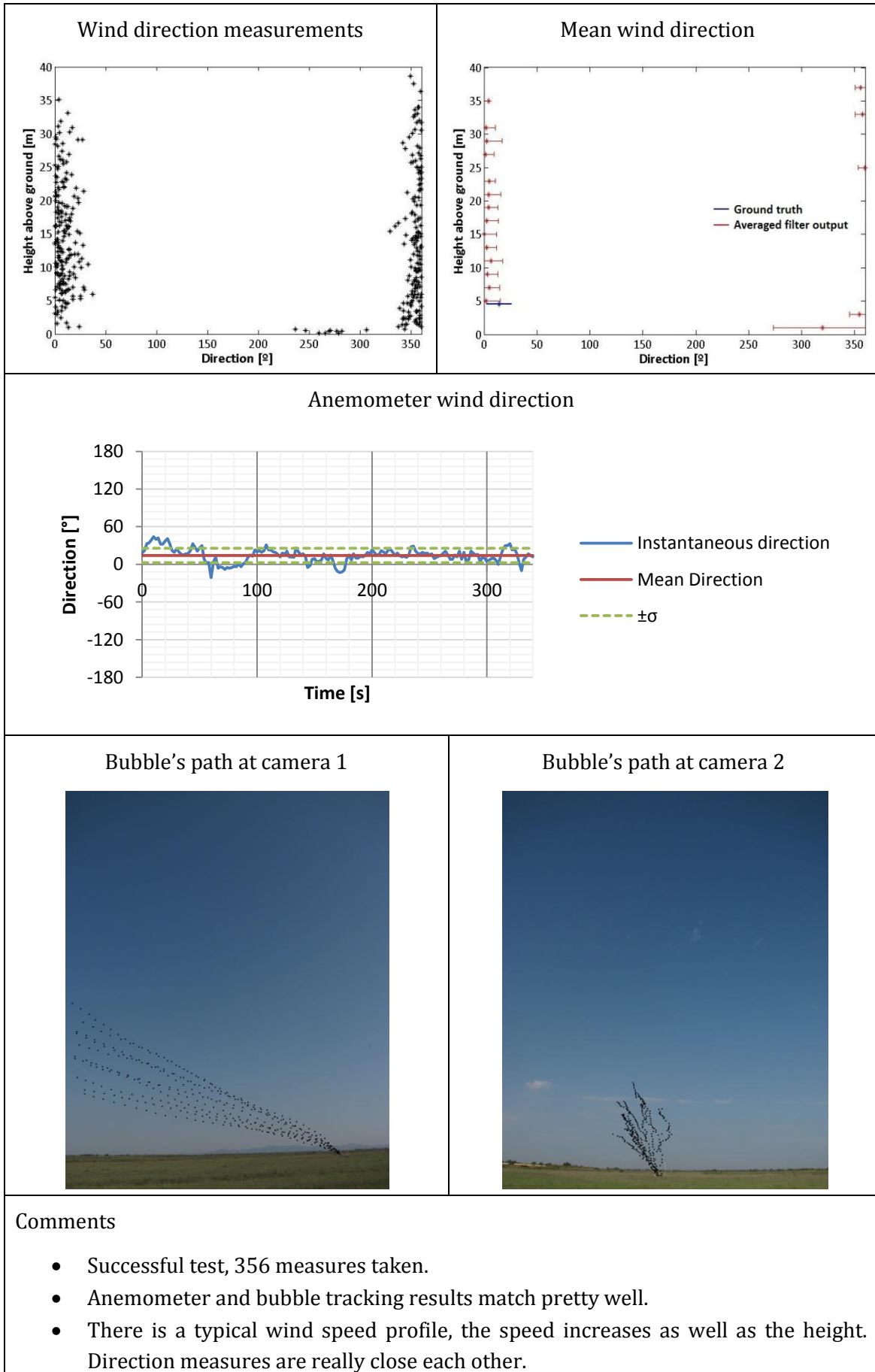
#### 4. Wind field measurement method based on free bubble tracking



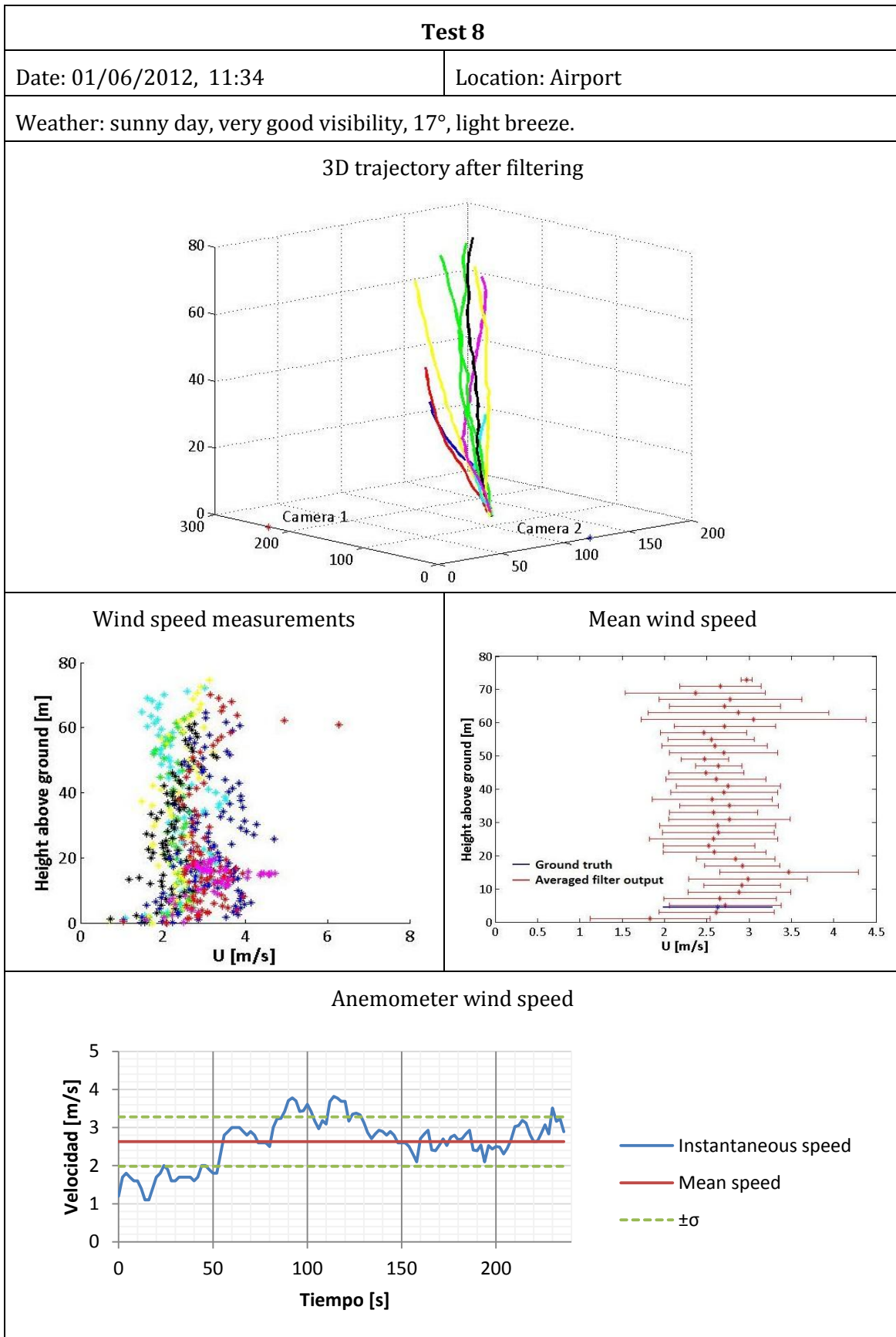
#### 4. Wind field measurement method based on free bubble tracking

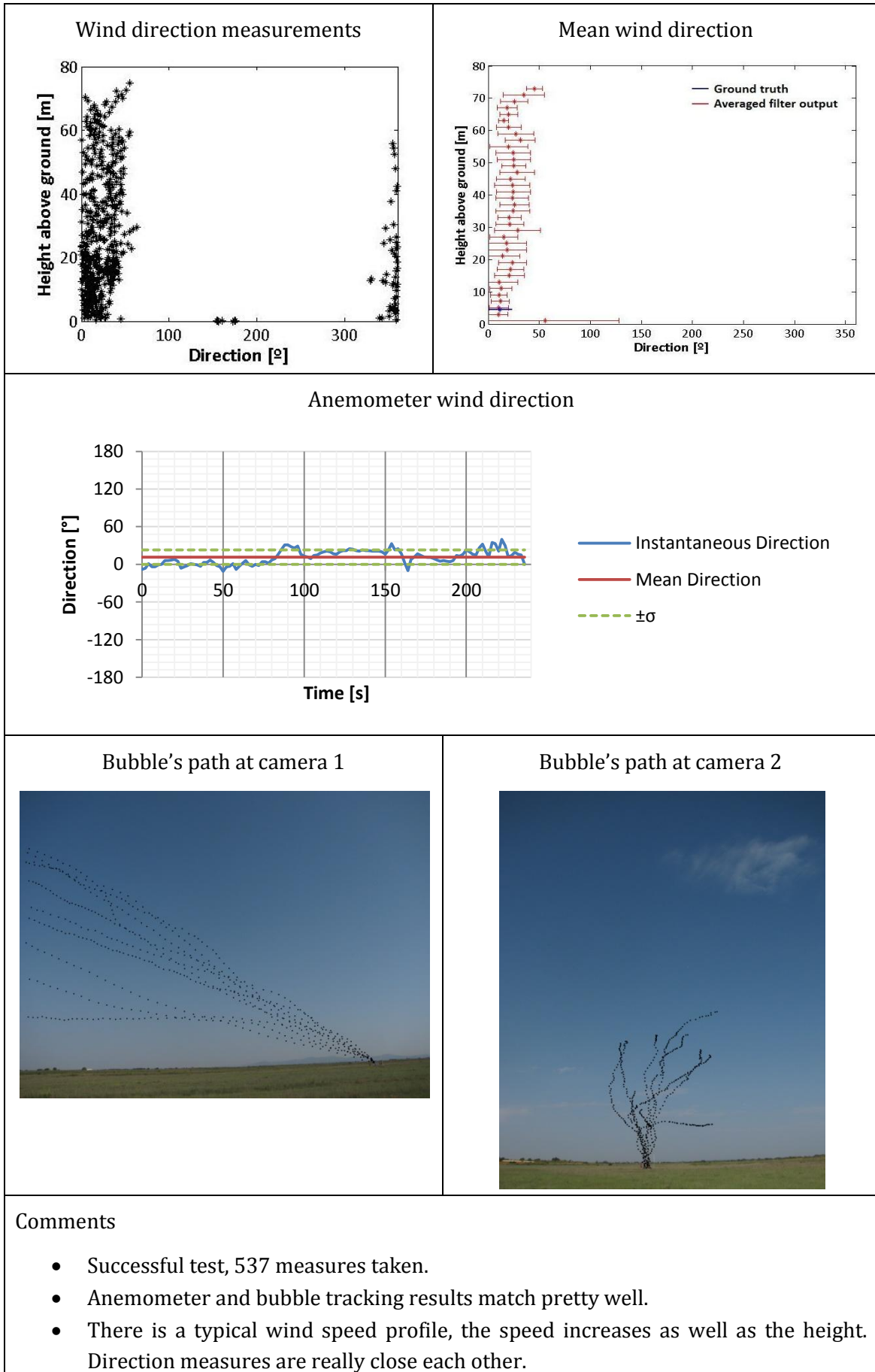




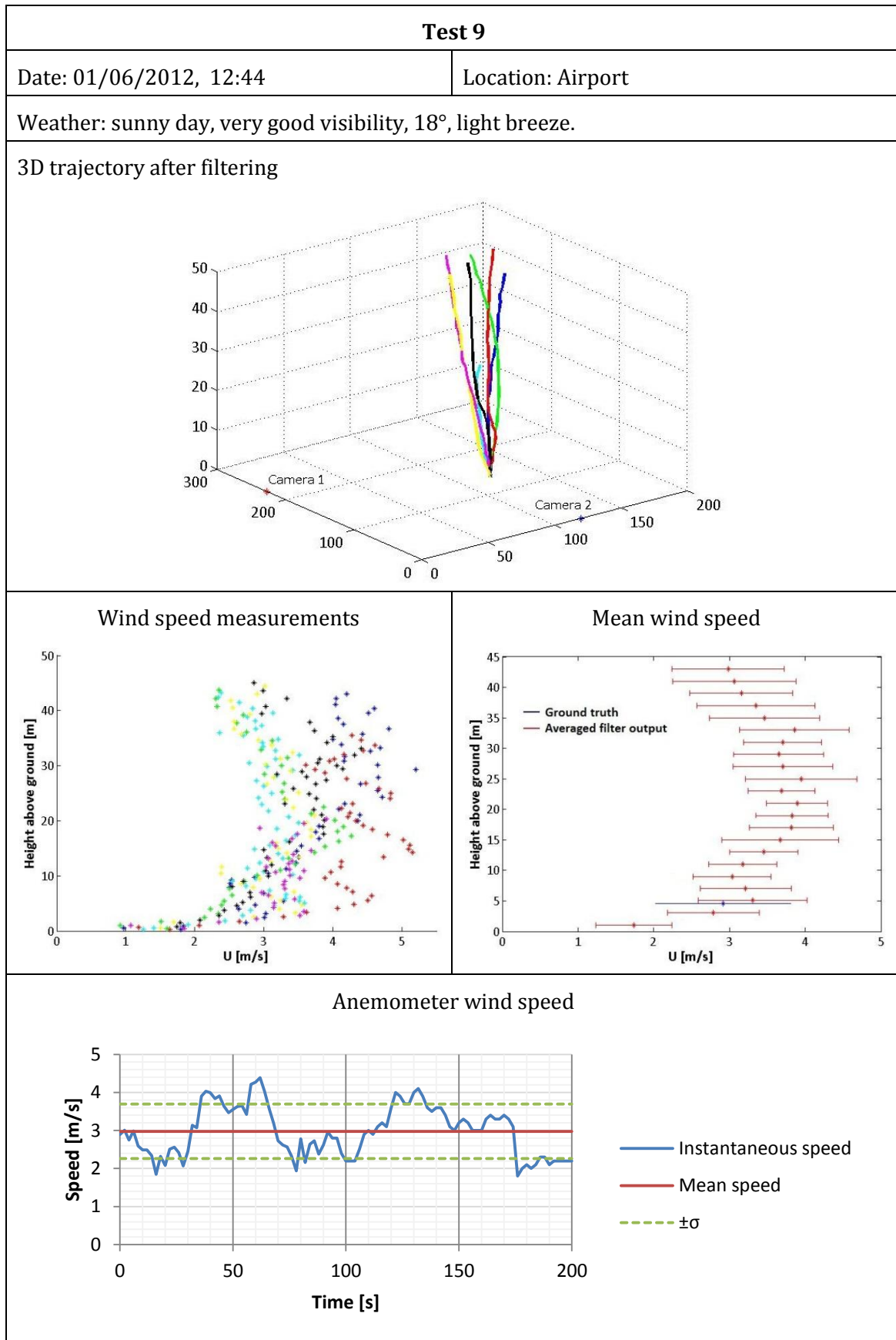


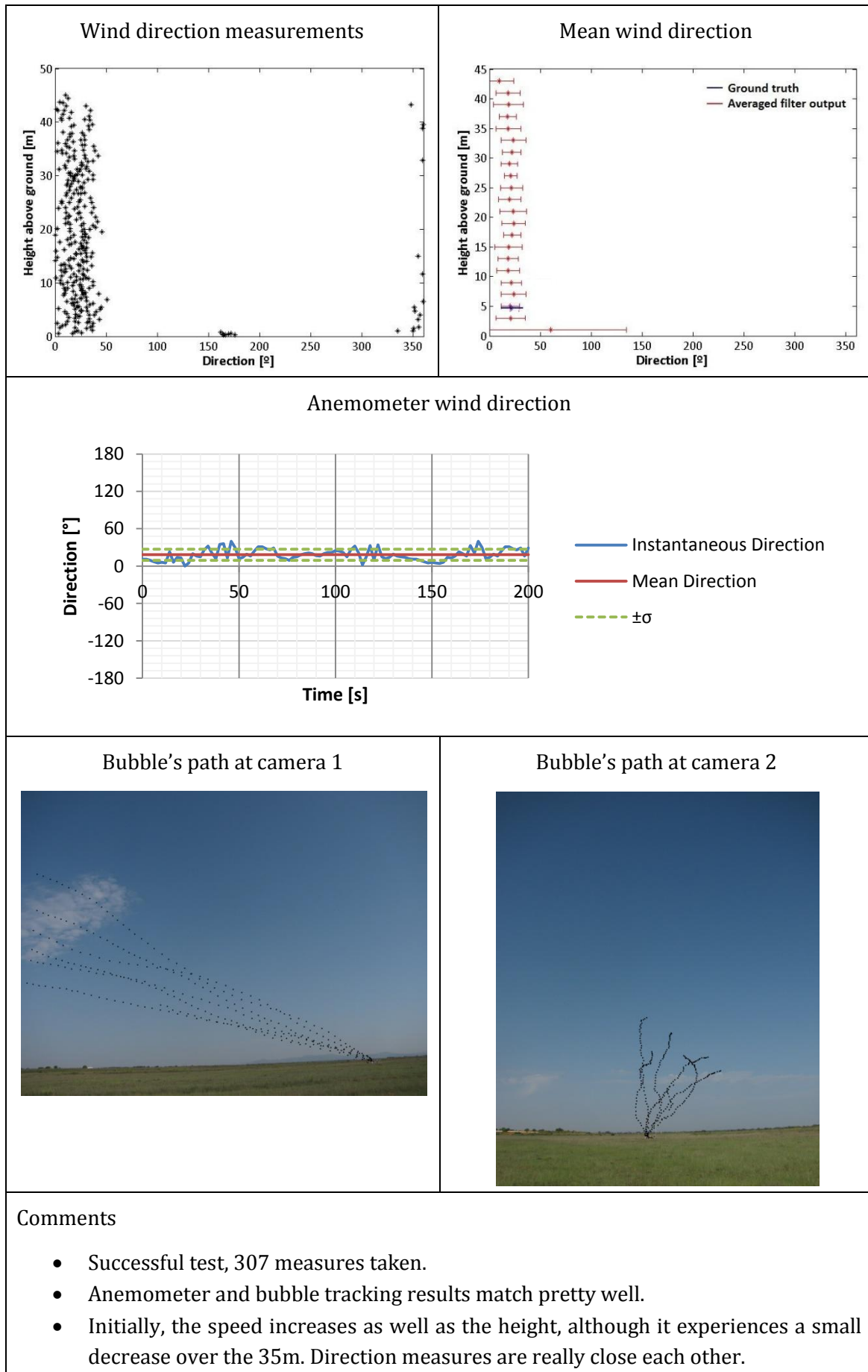
4. Wind field measurement method based on free bubble tracking



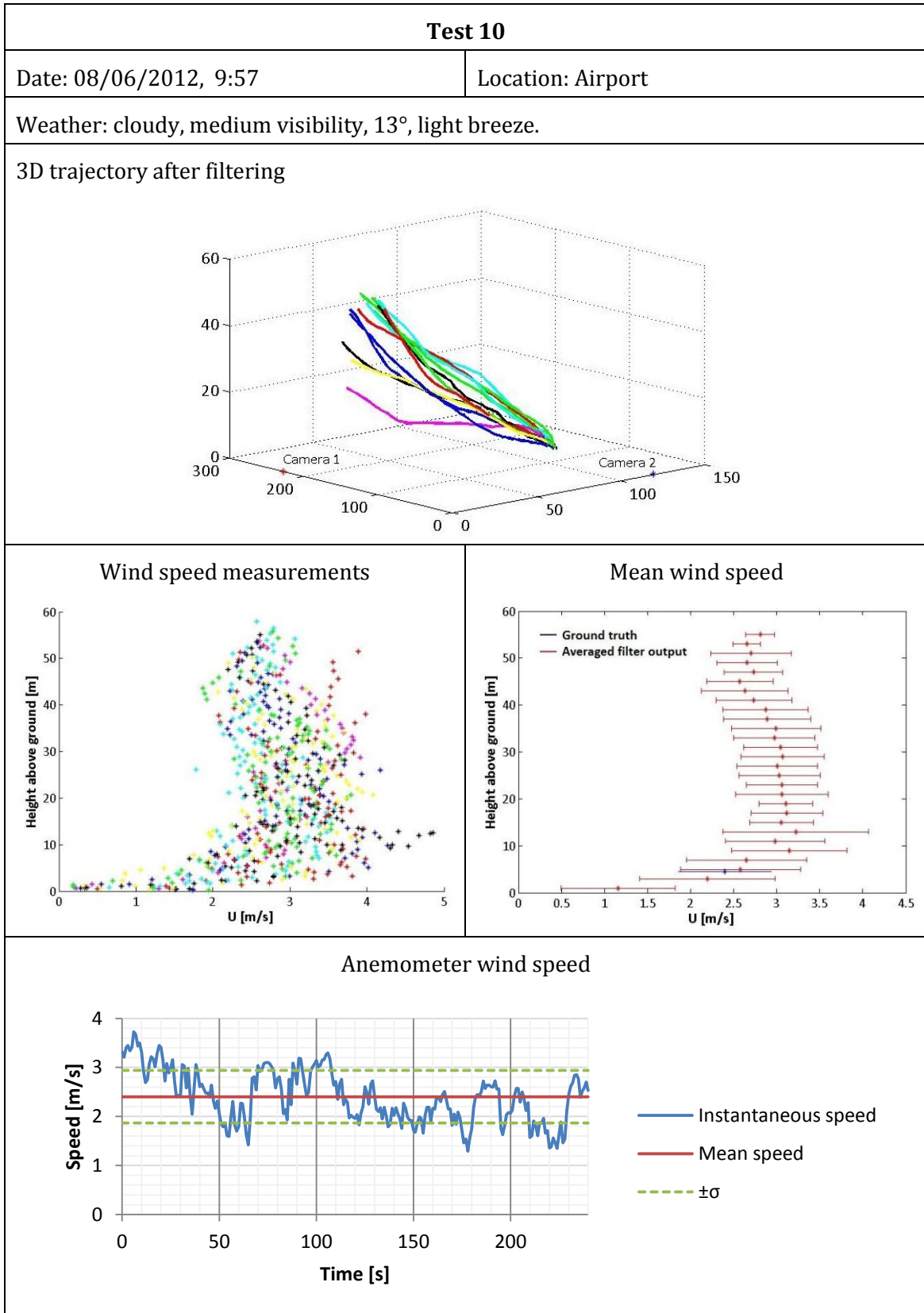


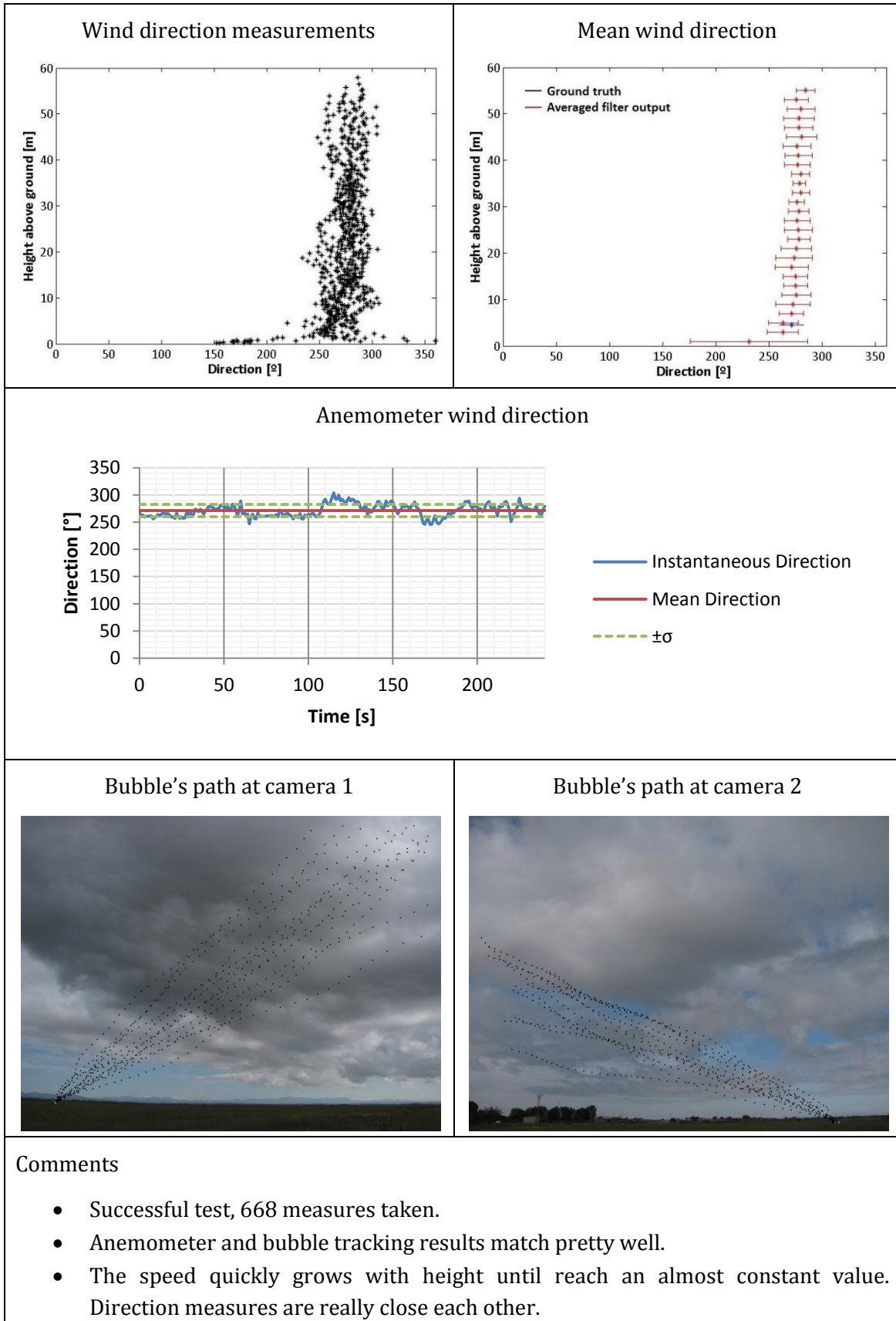
4. Wind field measurement method based on free bubble tracking





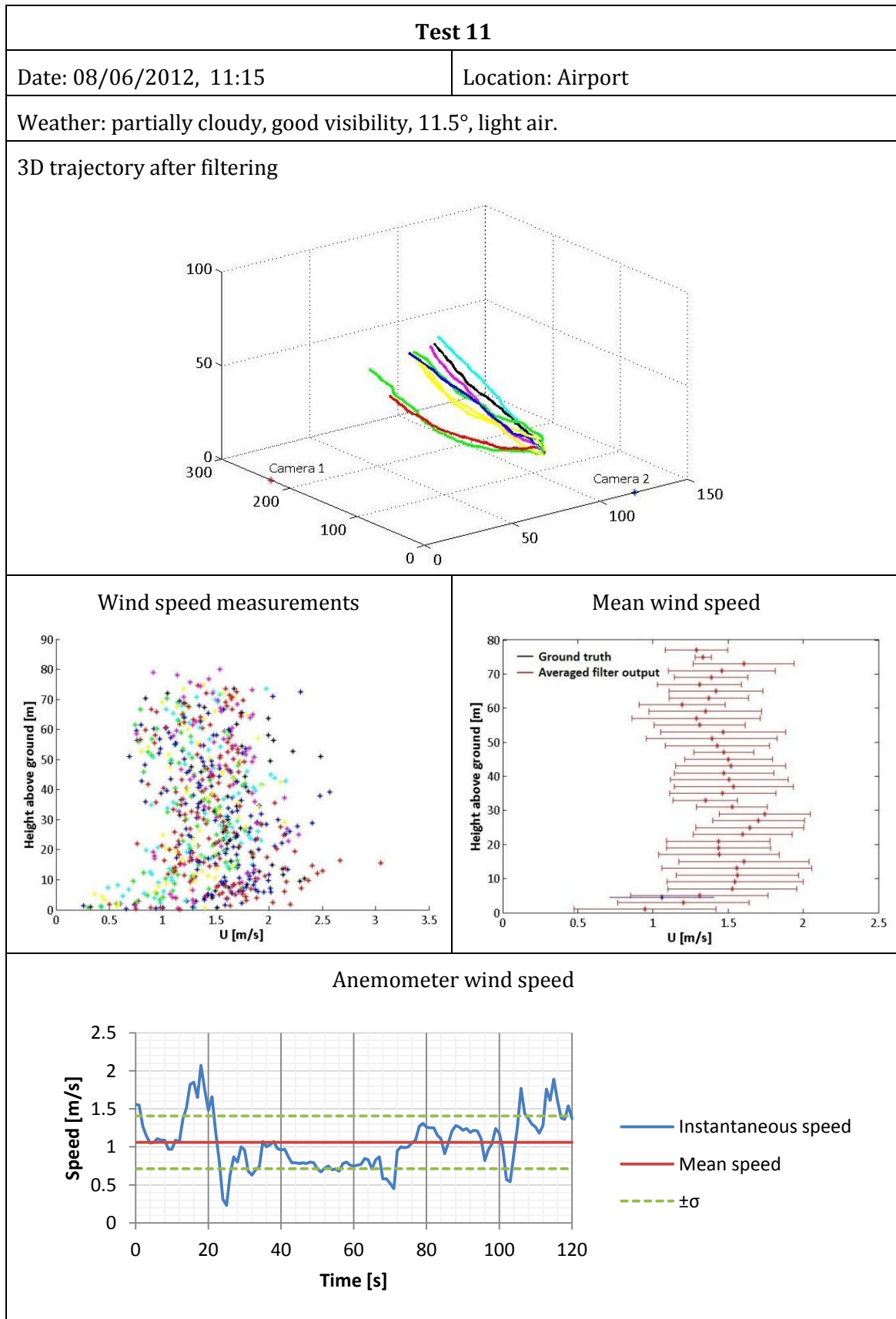
4. Wind field measurement method based on free bubble tracking



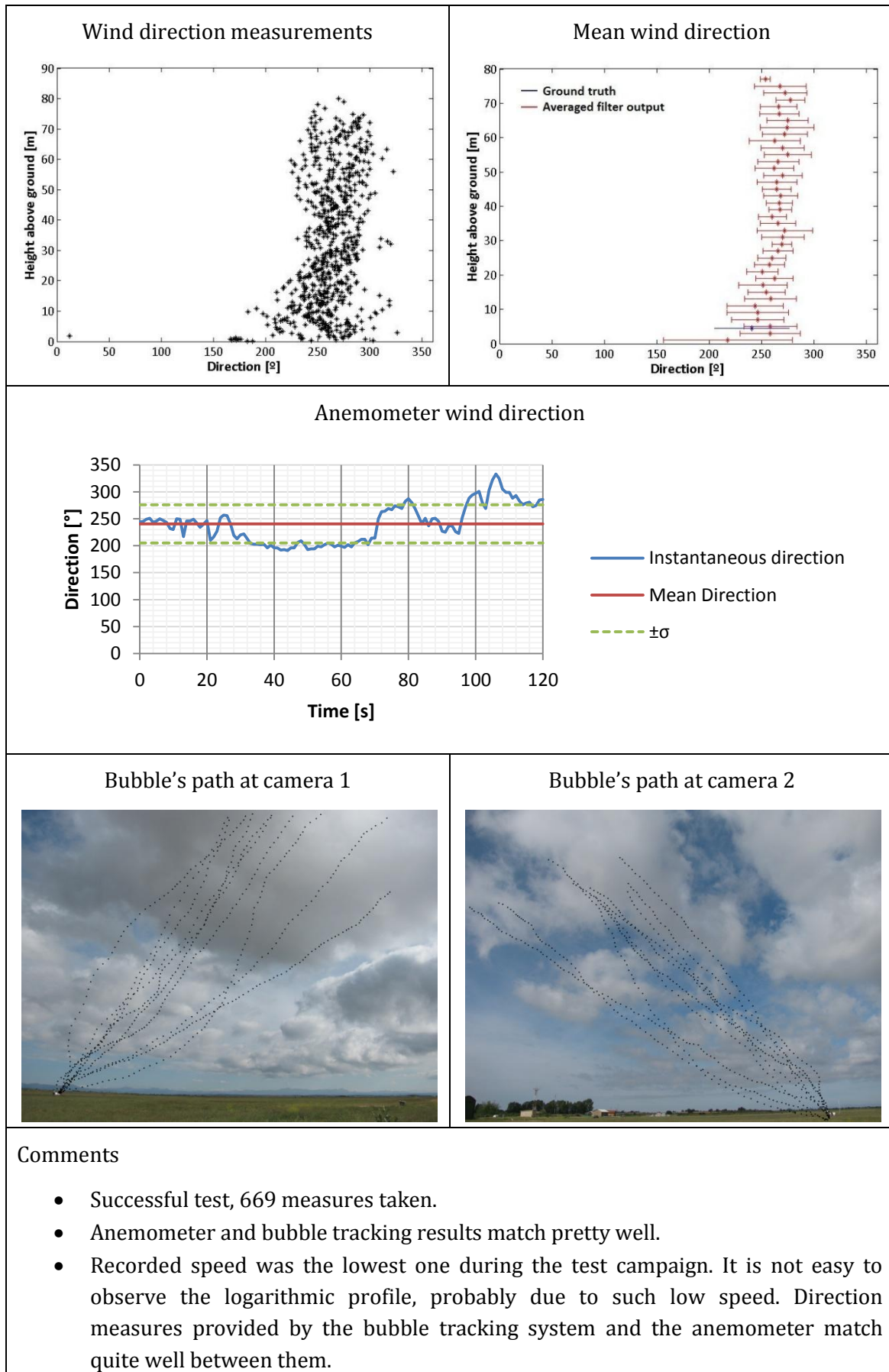




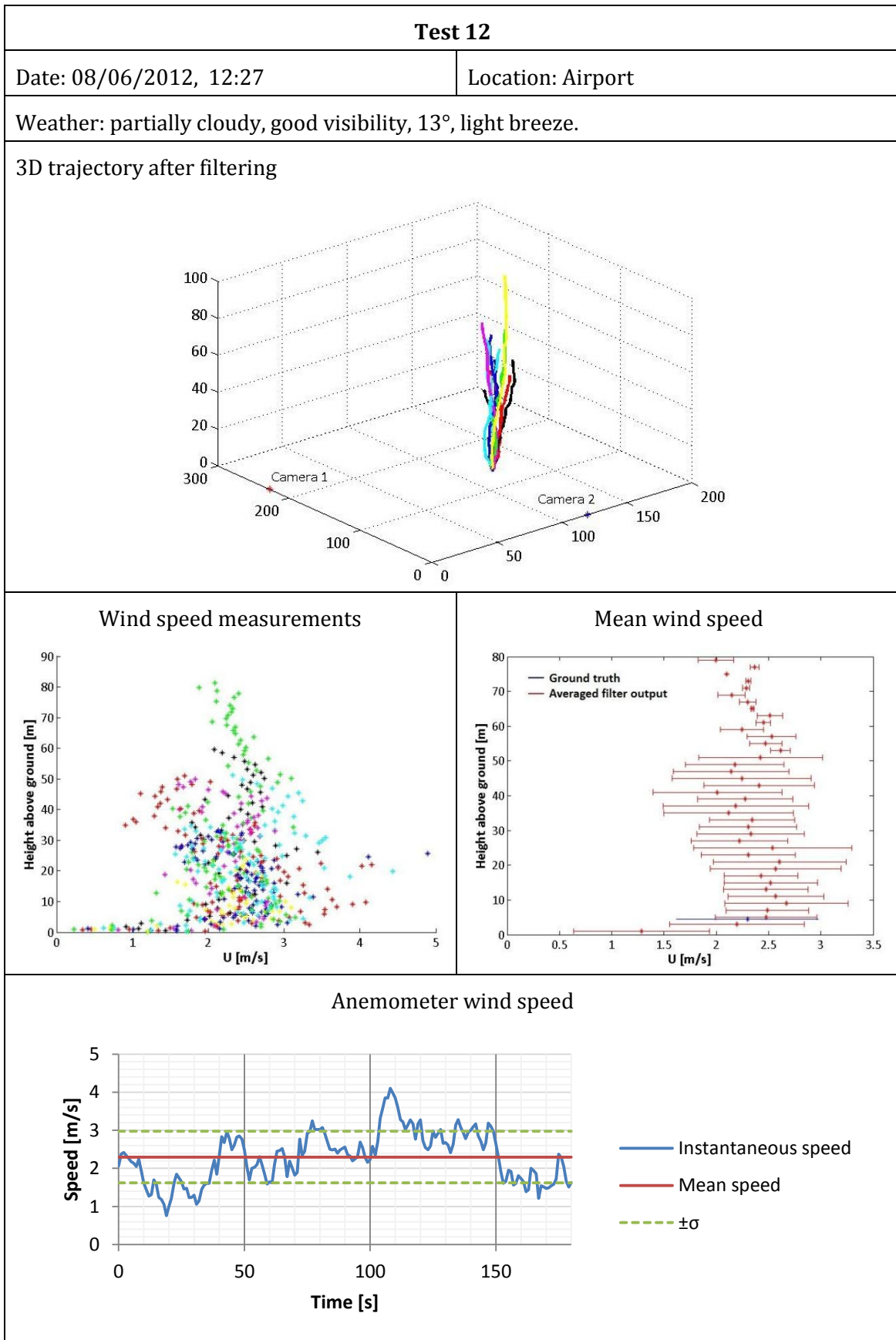
#### 4. Wind field measurement method based on free bubble tracking

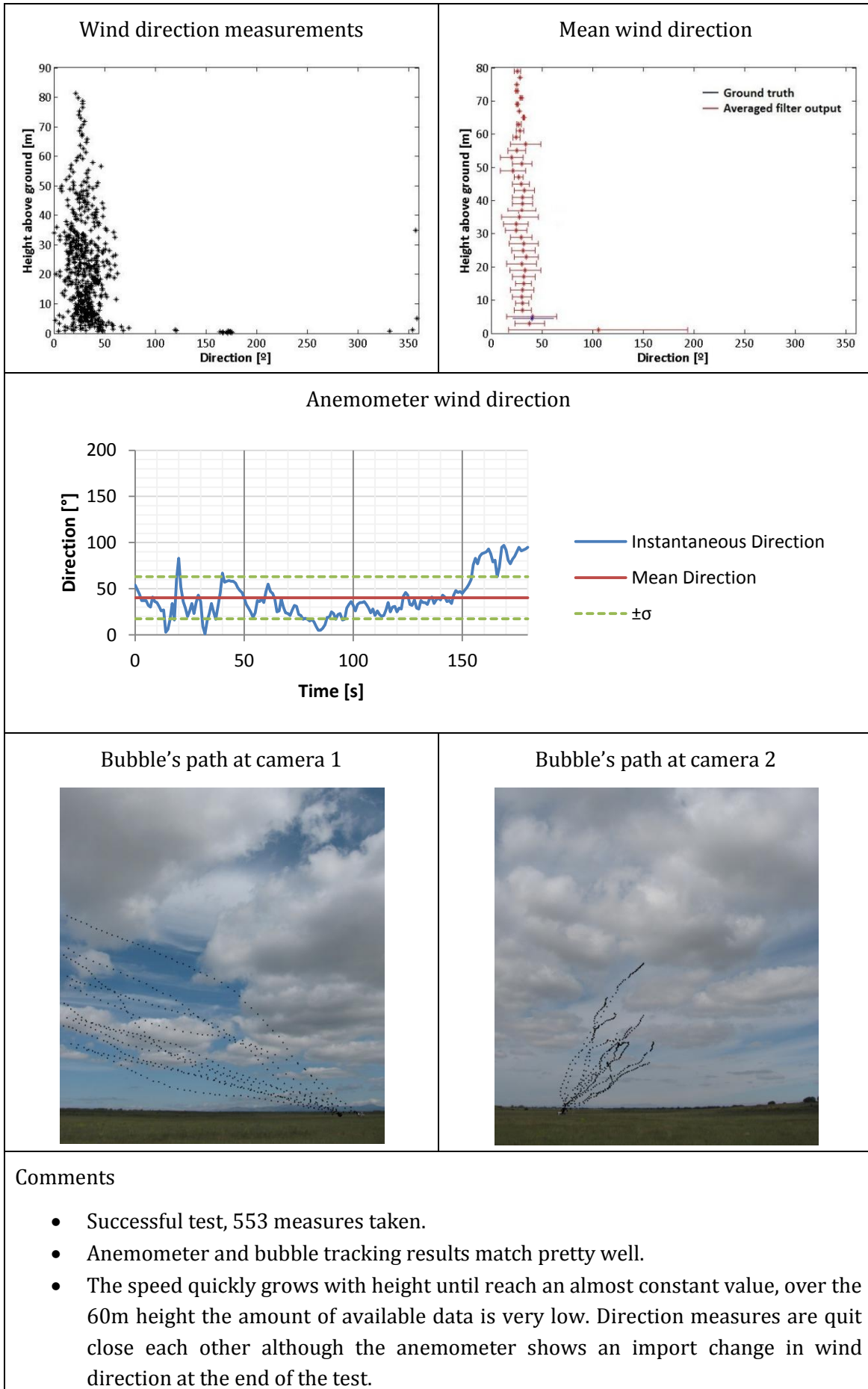






#### 4. Wind field measurement method based on free bubble tracking





A lot of information is showed in the previous tables. It must be pointed that measured wind conditions only have enough statistical significance when the amount of available data for a certain height is high. Due to this reason, results at the top are not reliable because usually the amount of available measurements is too low.

There is a clear difference between the velocity profiles obtained from the midday tests (sunny day) and those obtained at the beginning of the day. In the first case the velocity profile is almost vertical, even it decreases when the height grows; this situation of nearly constant profiles for the mean variables is quite common in a convective mixed boundary layer (Stull 2009). On the other hand, those profiles obtained in cold conditions reflect a more common profile for a neutral boundary layer. In this case when the height grows the velocity grows too. It could be noticed that the measured speed does not usually grow over the 20 m height. Initially, can be considered that this is an error due to an improper work of the measurement system but the team observed during the test that as bubbles rise their speed did not do it. The aerodynamic of the bubble clusters do not change with the altitude, although air density diminishes the difference is just too small. Also bubble size increases when external pressure goes down making down the influence of lower air density. Because of this, the only explanation for the obtained data is that, over the 20 m, wind speed almost does not grow with height.

The location where the essays took place is quite near the runway. On a sunny day the temperature of the runway can reach a very high value and this produces a strong convective motion. Under these conditions the boundary layer is a convective mixed layer, buoyancy is the dominant mechanism driving turbulence that is not completely random and sometimes is organized into identifiable structures such as thermals and plumes (Stull 2009). The turbulent motion of the air is also reflected in the wind direction, which varies in a wide range during the measurement period. This becomes clear when a wind direction profile obtained from a convective mixed boundary layer (Figure 53) is compared with another obtained from a neutral boundary layer (Figure 54). The spread of the measurements is quite bigger in the first case; this is a common consequence of turbulence and mixing processes that take place in these situations.

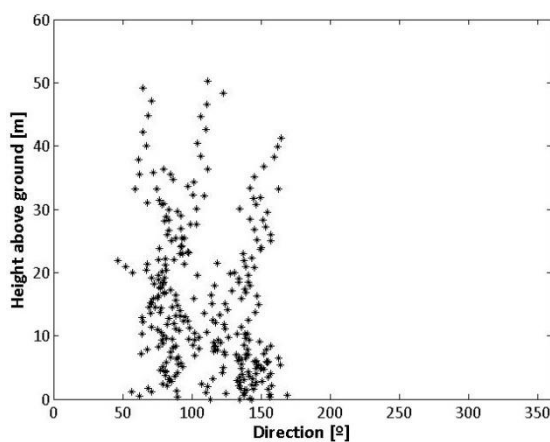


FIGURE 53: WIND DIRECTION MEASUREMENTS FOR CONVECTIVE MIXED BOUNDARY LAYER

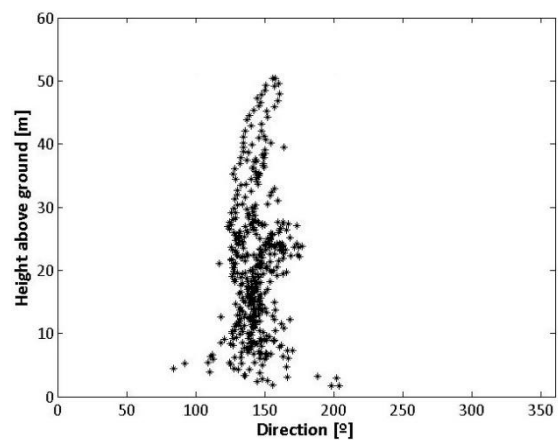
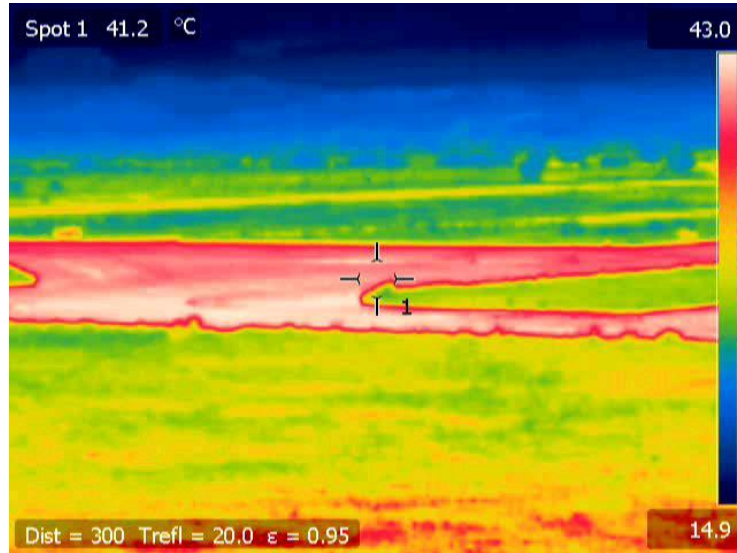


FIGURE 54: WIND DIRECTION MEASUREMENTS FOR A NEUTRAL BOUNDARY LAYER

Also, as the air during some of the experiments blew toward the runway, which is a great heat spot, the effect of buoyancy processes over the bubble clusters were more remarkable. These entire hypotheses can be also confirmed thanks to thermal images of the runway and the terrain around it.



The accuracy of the system can be evaluated thanks to the measurements obtained by the ultrasonic anemometer deployed during the tests that are summarized here Table 5 and Table 6.

TABLE 5: COMPARISON BETWEEN ANEMOMETER AND BUBBLE TRACKING RESULTS FOR WIND SPEED

Test N <sup>o</sup>	Anemometer mean speed [m/s]	Bubble tracking mean speed [m/s]	Difference [m/s]
1	2.36	2.38	0.02
2	1.77	2.26	0.49
3	1.69	1.99	0.30
4	3.24	3.54	0.30
5	3.40	3.56	0.16
6	2.04	2.20	0.16
7	2.66	2.74	0.08
8	2.63	2.69	0.06
9	2.98	3.18	0.20
10	2.40	2.48	0.08
11	1.06	1.28	0.22
12	2.30	2.41	0.11

TABLE 6: COMPARISON BETWEEN ANEMOMETER AND BUBBLE TRACKING RESULTS FOR WIND DIRECTION

Test N <sup>o</sup>	Anemometer mean direction [°]	Bubble tracking mean direction [°]	Difference [°]
1	115	124	9.00
2	116	124	8.00
3	137	140	3.00
4	90	78	-12.00
5	198	191	-7.00
6	356	2	6.00
7	14	0	-14.00
8	11	10	-1.00
9	19	22	3.00
10	271	263	-8.00
11	240	258	18.00
12	40	40	0.00

The system shows great performance, the root mean square error calculated for wind speed was only 0.22 m/s and for wind direction 9°.

#### 4.5. CONCLUSION

The method described in this section presents a new mechanism to measure wind speed and direction profiles in an affordable and safe manner, it is a reliable and low cost alternative to conventional ground sensors and remote sensing technologies like LIDAR or SODAR.

The system is based on the artificial generation of floating bubbles, lighter than air, and a filtered triangulation process able to determine instantaneous position and velocity from conventional imagery. The system performance was initially tested by means of computer simulations, showing encouraging results that have been confirmed by field test conducted in the airfield. The vertical wind speed and direction profiles have been obtained for the same place at different times and the atmospheric conditions vary quite a lot between them. Those obtained during very hot conditions, when warm rising air creates a lot of turbulence as well as coherent vertical structures, shows an almost vertical profile for wind speed and a wide spread for the wind direction. The validation has been done comparing the new proposed system results with those provided by a high precision

ultrasonic anemometer located at 6 meters high. The speed measured at this point by the bubble tracking system is quite similar to the anemometer one. As there isn't any equipment available in order to measure the full speed profile, an approximation has been employed in one of the tests done under neutral atmospheric conditions. In such neutral conditions, the speed profile can be quite well approximated by means of the logarithmical or the exponential law. In this case the exponential law was the selected one. The exponent  $\alpha$ , which is employed in the power law to model Earth roughness and boundary layer shape, can be assessed with the least squares method. In Figure 44 can be observed that extrapolated values matches quite well with the velocity profile obtained with the bubble tracking system. The value of the exponent  $\alpha$  is also the right one.

More efforts must be dedicated in the future to develop a full operational system, with improved image analysis and more automated processes; also a detailed calibration process might be developed to ensure system accuracy under different atmospheric conditions. Anyway, these initial results suggest that the proposed system allows the measurement of the instantaneous wind speed profile, as well as the wind direction, with an adequate accuracy. The plan is to apply the concept to an airport area, providing timely data to air controller and eventually pilots operating around. Of course, this information about the full local wind velocity profile could be extremely useful in order to improve the accuracy of the simulations conducted with a Mesoscale Numerical Model like the WRF.

In the next chapter, measurements provided by this system are employed in order to check the accuracy of the numerical method.





## 5. APLICACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN INTEGRADO EN ENTORNOS AEROPORTUARIOS

---

Una vez definida en los apartados anteriores la metodología a aplicar en las simulaciones del dominio de mesoescala y en el de microescala acoplado, así como elaboradas las herramientas informáticas necesarias; se procede a la puesta en práctica de todo lo planteado con el fin de poder determinar las prestaciones del sistema resultante.

### 5.1. CREACIÓN DEL DOMINIO DE MICROESCALA

En primer lugar se procede a crear, siguiendo las indicaciones del apartado 4.3.1, el dominio de trabajo. El área de estudio seleccionada viene definida por un cuadrilátero sobre el terreno, cuyos vértices se encuentran en las coordenadas:

280000 E	286000 E
4716500 N	4722500 N

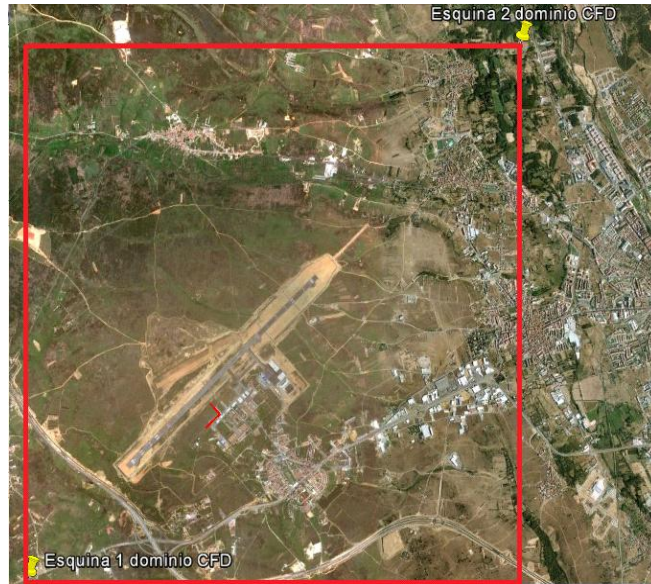


FIGURE 55: ZONA DE ESTUDIO DOMINIO DE MICROESCALA

El dominio, con 6 km de ancho por 6 de alto, cubre por completo la pista del aeropuerto y sus proximidades, alcanzando una altura de 1000 metros. Por su parte la orografía del dominio es fundamentalmente llana, como corresponde a un aeropuerto, destacando un pequeño valle que atraviesa el dominio de este a oeste por encima de la cabecera 23 y una vaguada en la esquina inferior izquierda, justo en las inmediaciones de la cabecera 05, por la cual discurre una autovía.

Se elabora así en OpenFOAM la malla bidimensional, aunque con relieve, que se habrá de utilizar como parte del modelo acoplado y cuya superficie del terreno una vez llevada a cabo la discretización queda como se aprecia en la imagen



FIGURE 56: SUPERFICIE DEL DOMINIO DE MICROESCALA EN EL MODELO ACOPLADO

## 5.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO

Una de las primeras tareas que debe siempre realizarse en cualquier problema de CFD es un análisis de sensibilidad frente a las diferentes posibilidades de discretización o mallado del dominio. Esto es así porque los tiempos de resolución son proporcionales al número de elementos o nodos en que se discretiza el espacio, de manera que es un objetivo de primer orden trabajar con el menor número posible de nodos sin producir una pérdida apreciable de precisión en la solución. Puesto que se usan mallas estructuradas y de celda cuadrada, son de especial relevancia la altura de la primera celda sobre el terreno y el tamaño en planta de las celdas.

Respecto a la altura de la primera celda, se ensayarán las siguientes mallas:

TABLE 7: LISTA DE MALLAS EMPLEADAS EN EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

	<b>Malla 1</b>	<b>Malla 2</b>	<b>Malla 3</b>
Altura 1ª celda	1.3 m	0.5m	0.1m
Resolución Horizontal	20x20m	20x20m	20x20m
Nº Celdas verticales	40	40	40

Dichas alturas no corresponden a valores triviales, 1.3 metros era la altura mínima que resultaba necesaria en caso de emplear funciones de pared con rugosidad de grano de arena, en tal caso el valor de rugosidad 0.6 metros imponía dicho valor como altura mínima para el centro de la celda, siendo así la altura total de 1.3 metros tras aplicar 0.10 metros de margen. En el caso de las celdas de 0.1 metros de altura, este es un valor lo suficientemente bajo para conseguir valores de  $y^+$  adecuados cuando la velocidad no es muy elevada. Finalmente 0.5 metros es un valor intermedio entre ambos.

Las ubicaciones de referencia para los muestreos aparecen indicadas a continuación



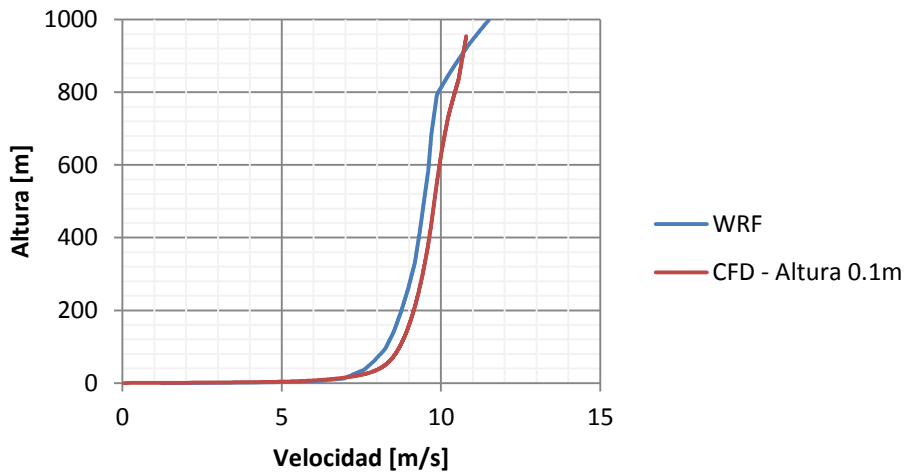
FIGURE 57: UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO EN EL ENTORNO AEROPORTUARIO

Coordenadas de los puntos:

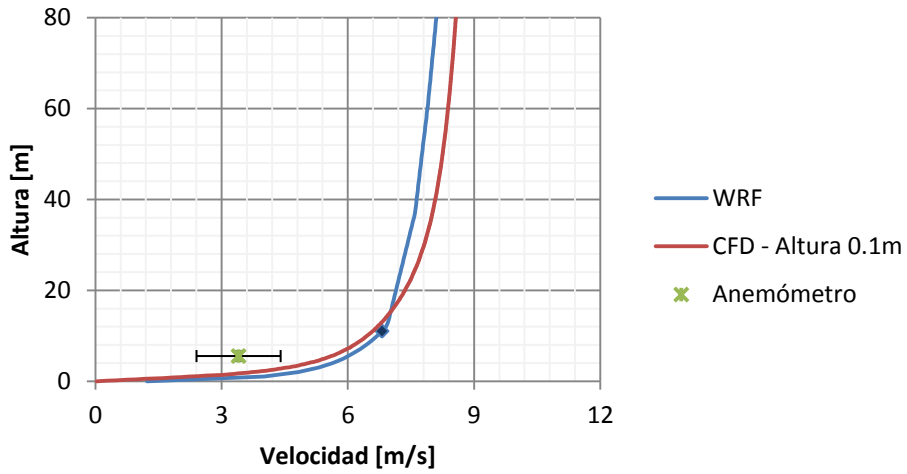
Punto	UTM [m]	UTM [m]	Altura [m]	Comentario
1	280000 E	4719500 N	915	Punto central cara oeste
2	283000 E	4722500 N	921	Punto central cara norte
3	282525 E	4718980 N	891	Zona central de la pista
4	281230 E	4717770 N	896	Cabecera 05 de la pista
5	283580 E	4719970 N	887	Cabecera 23 de la pista
6	280000 E	4719500 N	896	Punto central cara este
7	283000 E	4722500 N	887	Punto central cara sur

Con objeto de llevar a cabo el análisis de sensibilidad geométrico, se simularán las condiciones atmosféricas encontradas durante uno de los ensayos realizados en el anterior capítulo, concretamente con los datos obtenidos a partir del escenario generado por el WRF para el día 17 de mayo a las 11:10 GMT. Se emplearán los datos captados por el anemómetro como punto de referencia para la simulación. En las siguientes gráficas se muestran los perfiles completos de velocidad (1000 metros de altura) obtenidos para la ubicación 3 por el WRF y el modelo acoplado. Se incluye también una ampliación de los primeros 80 metros del perfil en los que se incluye el valor de la velocidad medida por el anemómetro.

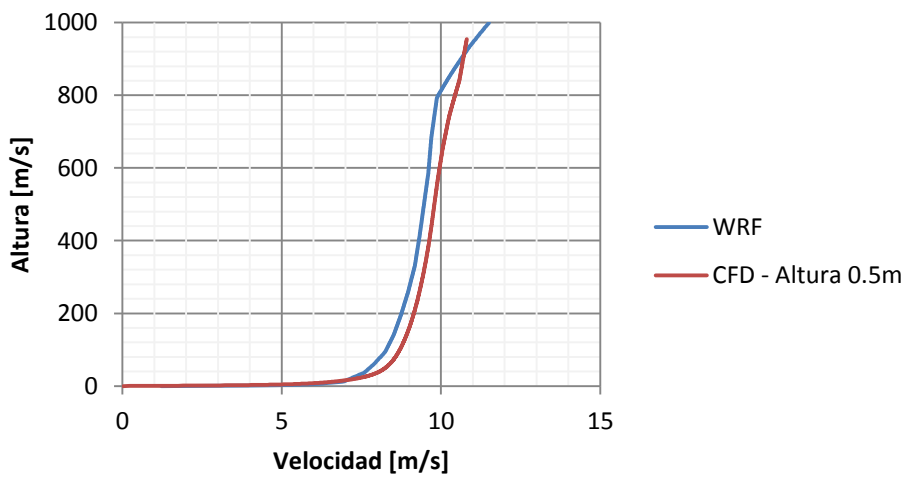
Perfil WRF - Prueba con CFD 0.1m

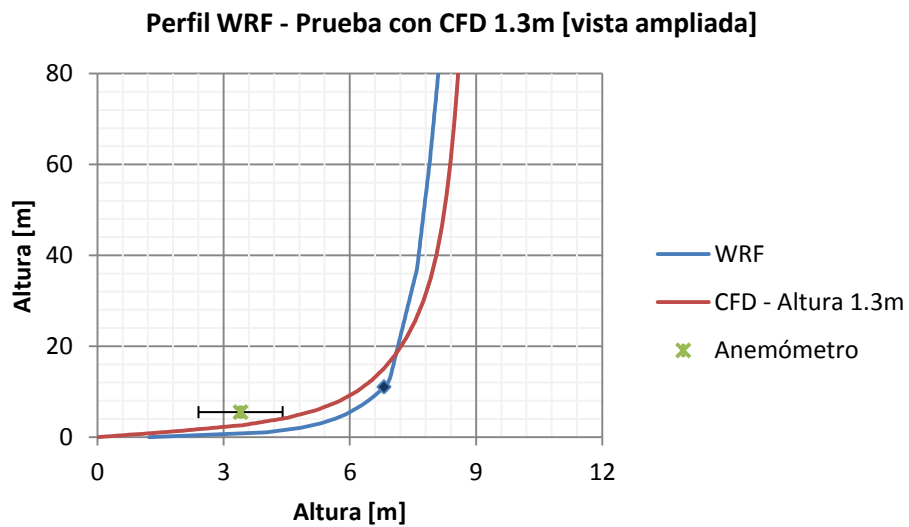
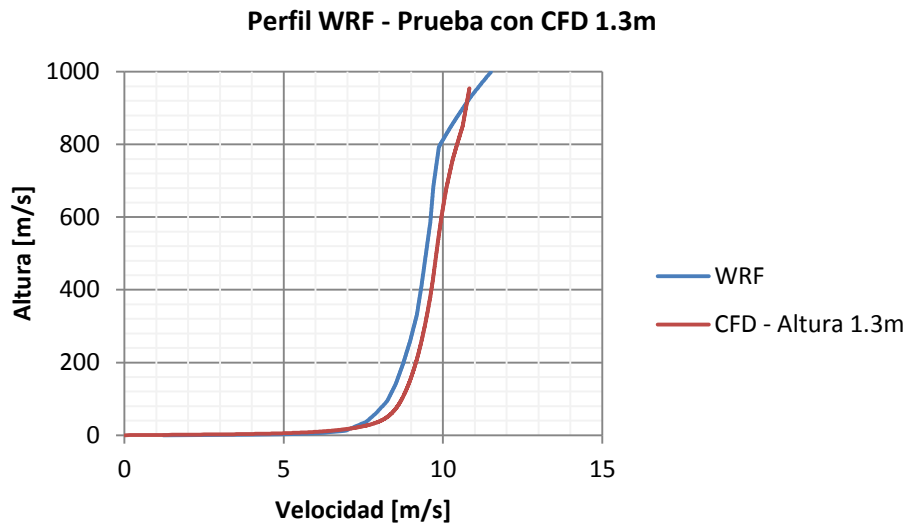
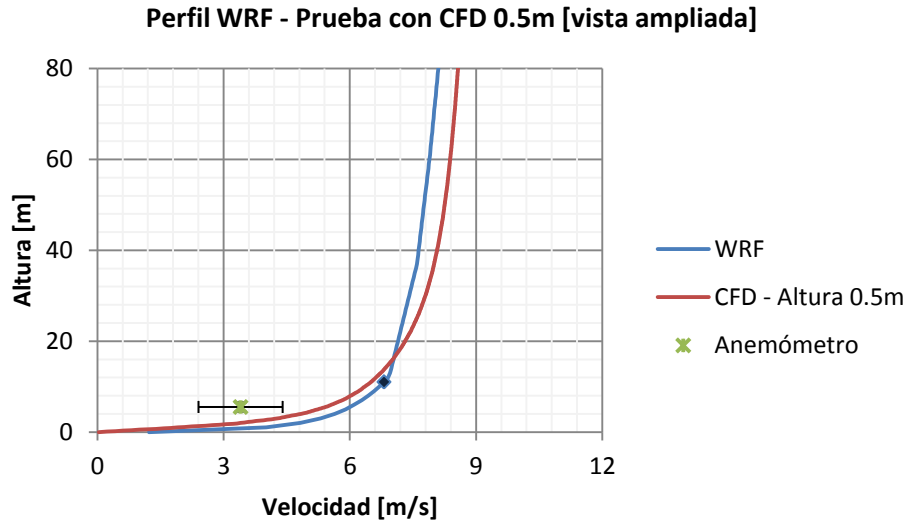


Perfil WRF - Prueba con CFD 0.1m [vista ampliada]



Perfil WRF - Prueba con CFD 0.5m





Las gráficas muestran que la malla con la primera celda más baja es la que permite conseguir, en el primer tramo de alturas, un perfil de velocidad de velocidades logarítmico semejante al empleado para ajustar la parte inferior del perfil del WRF.

Para comprobar la correcta convergencia de la solución obtenida por el modelo numérico se recurre a observar la evolución de los residuales a medida que se realizan las sucesivas iteraciones. Se muestra a continuación el valor de los residuales obtenidos durante la simulación de la malla de 0.1 metros de altura en la primera celda, siendo los de las otras simulaciones muy semejantes.

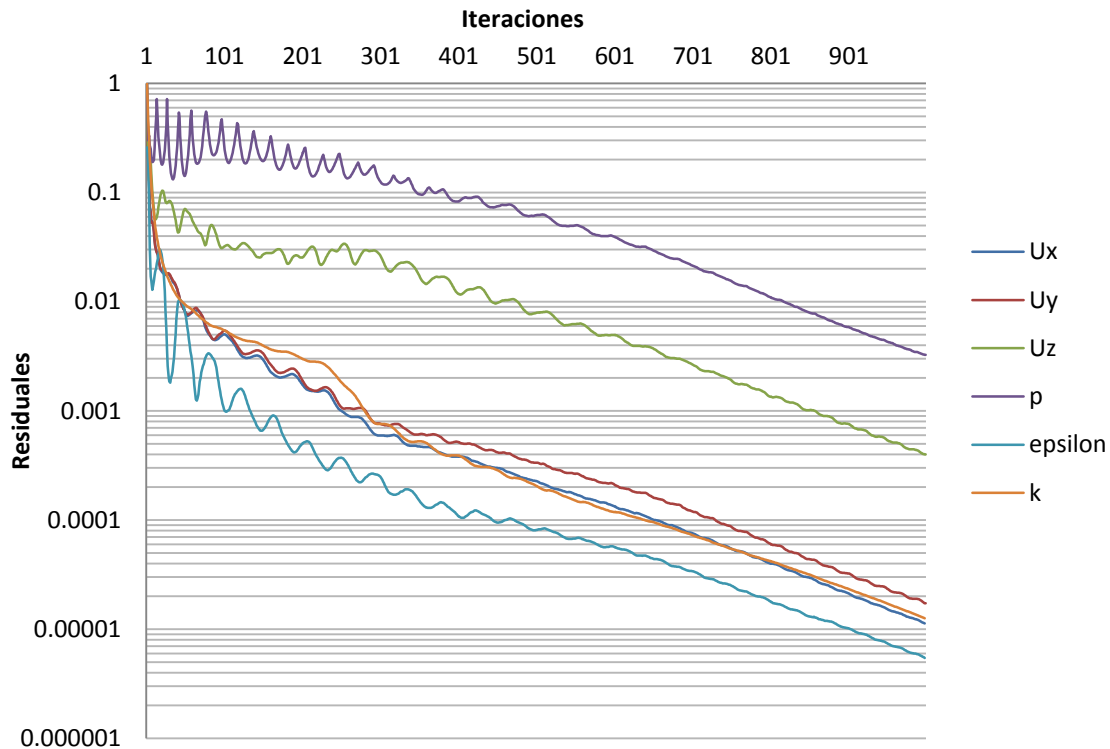
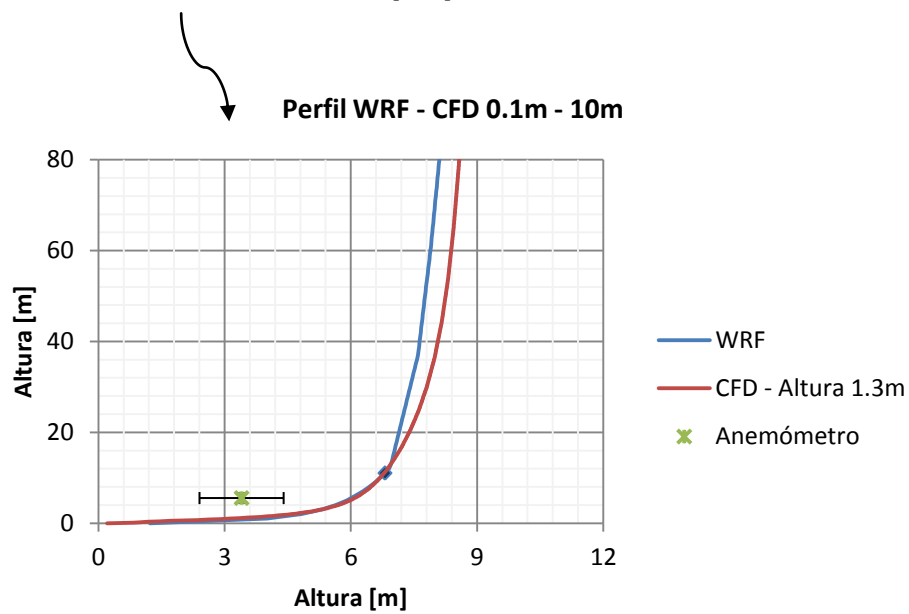
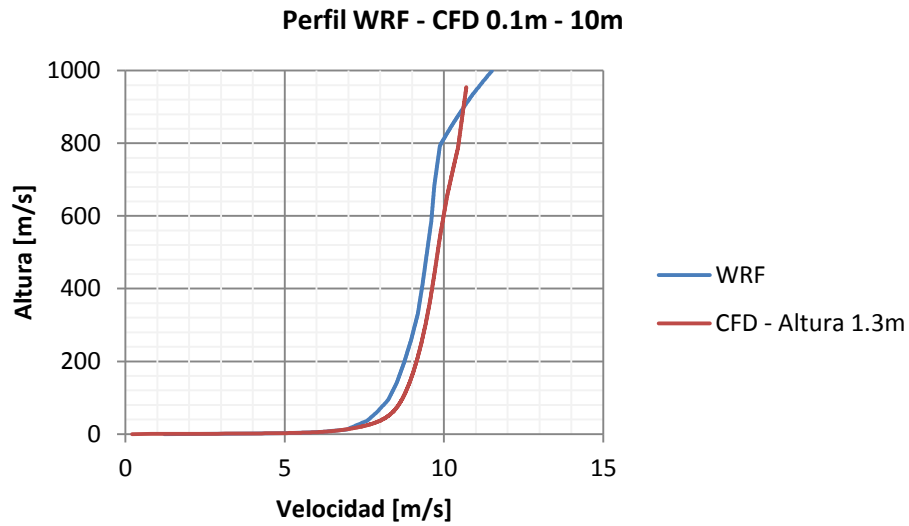


FIGURE 58: EVOLUCIÓN DE LOS RESIDUALES DURANTE LA SIMULACIÓN DEL MODELO ACOPLADO

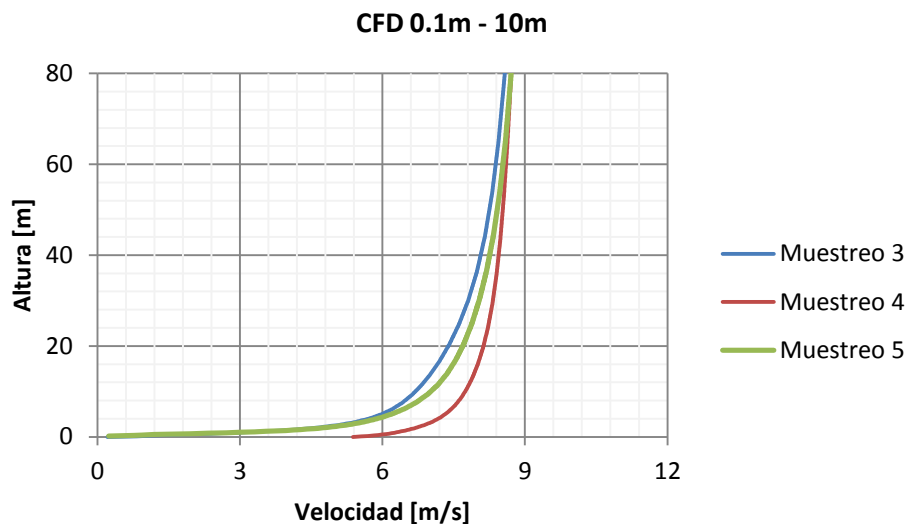
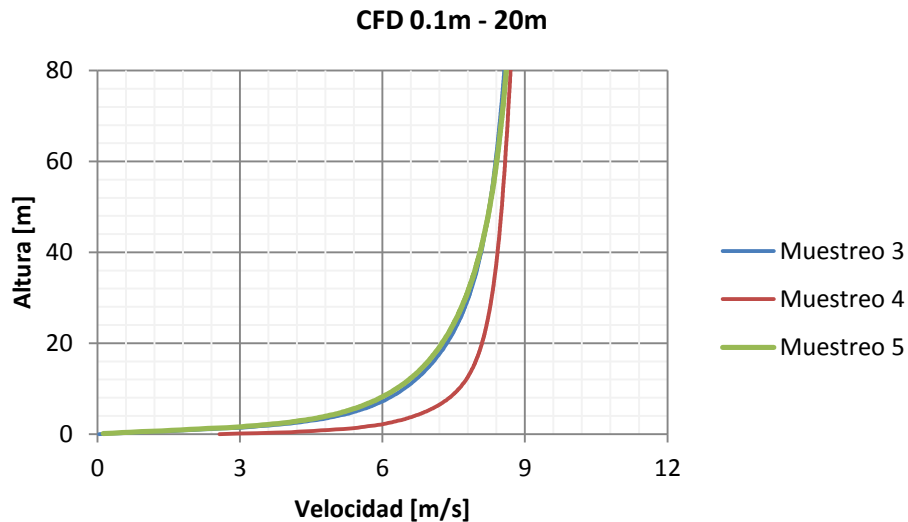
Tras las oscilaciones iniciales los residuales muestran una clara tendencia descendente, de tal forma que alcanzan valores lo suficientemente bajos tras 2000 iteraciones, en la Figure 58 se muestra ampliada únicamente la zona correspondiente a las 1000 primeras iteraciones.

Se procede también a analizar el efecto que ocasiona emplear una mayor resolución horizontal, pasando de celdas de 20 metros de lado a otras de únicamente 10. Se presentan a continuación los resultados:



Se procede a comprobar también la forma que adoptan los perfiles de velocidad en diferentes puntos del dominio, para ello se muestran a continuación los perfiles en las ubicaciones 3, 4 y 5 para las discretizaciones horizontales de 10 y 20 metros





Los tres perfiles mostrados en las gráficas anteriores presentan la adecuación del viento a la orografía local. Como puede comprobarse en la Figure 23, por debajo de la cabecera 05 de la pista del aeropuerto discurre una autovía, siendo la elevación de la pista en esa zona importante. Por ello en el punto de muestreo 4, localizado en dicha cabecera, la velocidad del viento es sensiblemente mayor en la zona próxima al terreno, como consecuencia de la aceleración experimentada por el aire al bordear el desnivel.

En el caso de la simulación con mayor resolución horizontal es posible apreciar una mayor diferenciación entre los perfiles conseguidos en las distintas ubicaciones. Esto parece una consecuencia lógica del mayor detalle con que se capta el relieve del terreno, ahora bien, los requisitos de cálculo se multiplican, al generarse una malla con 4 veces más de elementos (3.6 millones cuando se emplean celdas de 20x20 metros frente a 14 millones

de celdas con resolución 10x10 metros). De esta forma los tiempos de cálculo<sup>11</sup> pasan de 3.5 segundos por iteración (7000 segundos para la simulación completa) a 26.5.

Es por ello que, en tanto la resolución de 20 metros parece captar con suficiente detalle la orografía del terreno en el entorno aeroportuario, será la que se emplee por defecto. En caso de aplicar el modelo en entornos con una orografía más compleja se considerará en el momento la necesidad de incrementar la resolución.

### 5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA DIFERENTES CONDICIONES DE LA ATMÓSFERA

Las condiciones atmosféricas resultan altamente cambiantes y en función del tipo de atmósfera existente los procesos físicos predominantes difieren en su naturaleza. Así en una atmósfera convectiva los movimientos del aire están fuertemente influenciados por las diferencias de temperatura, aspecto este que puede ser incluso despreciado en una atmósfera neutra. Para comprobar la respuesta del modelo ante diferentes situaciones atmosféricas se realizan simulaciones correspondientes a los momentos en que se llevaron a cabo las pruebas de campo del sistema de medición de perfiles de viento en altura. En las siguientes gráficas se muestran conjuntamente los resultados de las mediciones realizadas in situ con los perfiles obtenidos a partir de las simulaciones en cada una de las fechas indicadas. Los perfiles del CFD y WRF mostrados en la siguientes tablas son los obtenidos por cada uno de esos modelos para el punto central del dominio que es coincidente con el de realización de los ensayos:

---

<sup>11</sup> Simulaciones realizadas en 128 núcleos en el supercomputador Caléndula de la *Fundación Centro de Supercomputación de Castilla y León*, procesadores Intel Xeon E5450 y una ratio de 2GB RAM/núcleo.

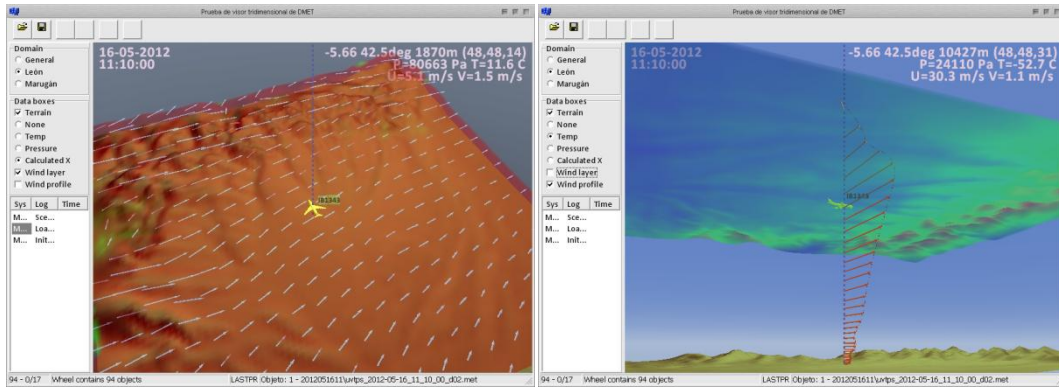
**Test 1**

Fecha: 16/05/2012, 13:10

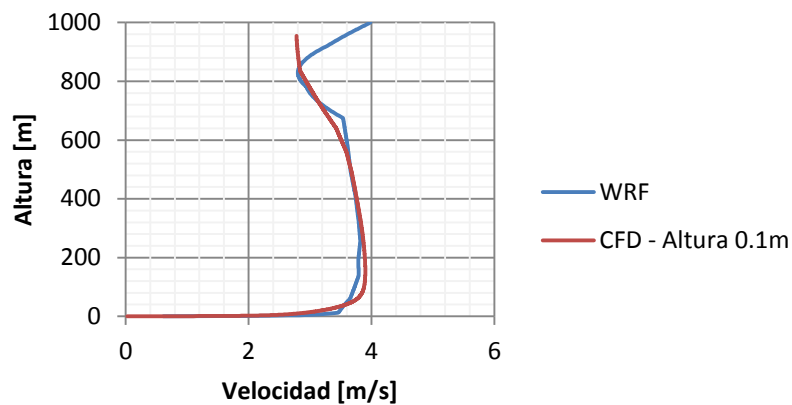
Ubicación: Aeropuerto

Tiempo: Día soleado, muy buena visibilidad, 22°, brisa débil.

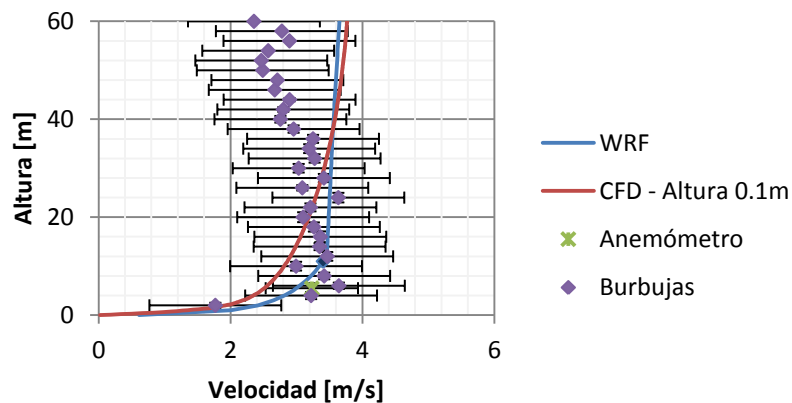
Escenario WRF para las 11:10 GMT



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



Comentarios: El perfil procedente del modelo de mesoescala adapta su parte inferior a las características del terreno, mientras que en su parte superior el perfil generado por el CFD adopta unas formas más suaves y razonables sin cambios bruscos en la velocidad.

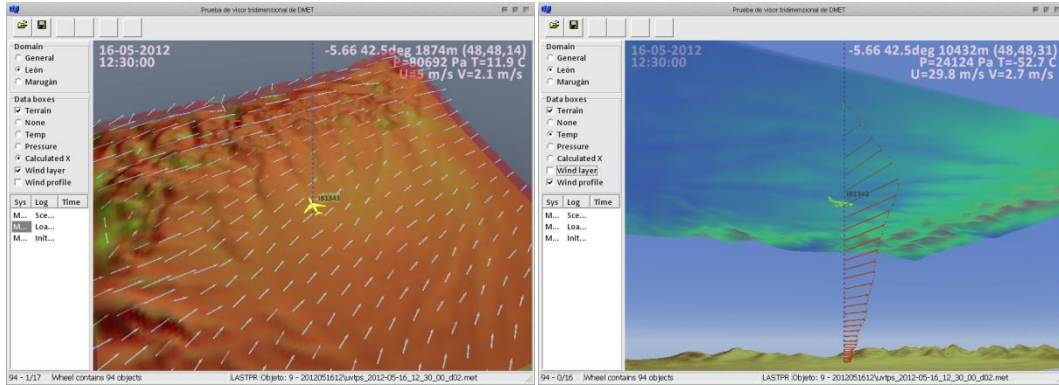
**Test 2**

Fecha: 16/05/2012, 14:30

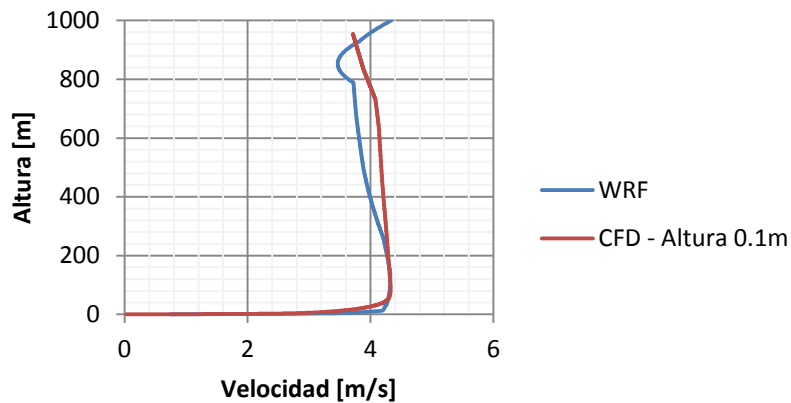
Ubicación: Aeropuerto

Tiempo: Día soleado, muy buena visibilidad, 22°, brisa débil.

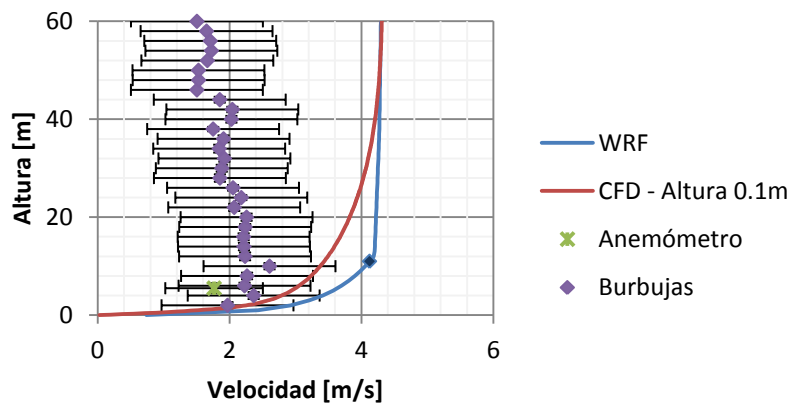
Escenario WRF para las 12:30 GMT



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



**Perfil WRF - CFD 0.1m - Mediciones**



Comentarios: El perfil procedente del modelo de mesoescala se ve adaptado por su parte inferior a las características del terreno, mientras que en su parte superior el perfil de velocidades del CFD adopta unas formas más suaves y razonables.

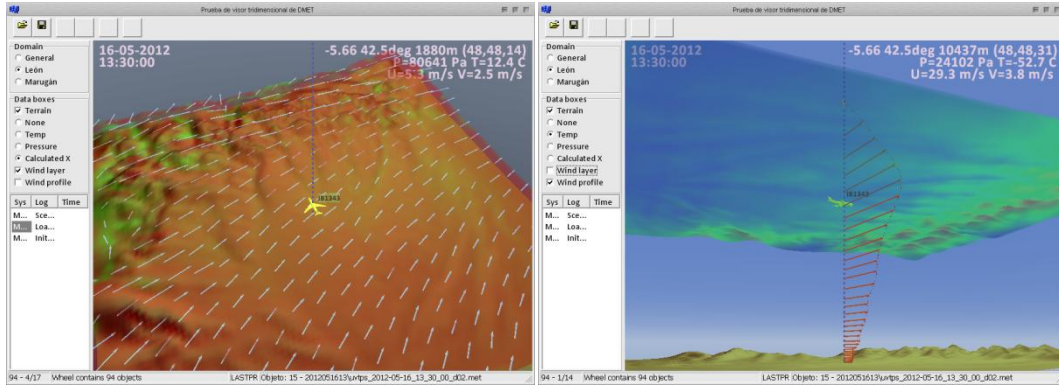
**Test 3**

Fecha: 16/05/2012, 15:30

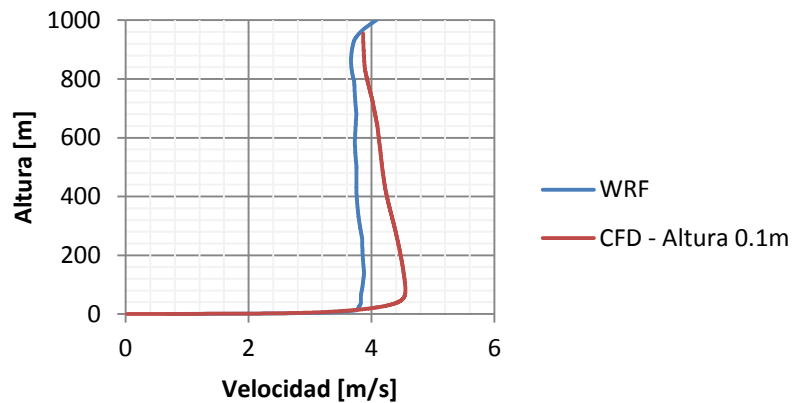
Ubicación: Aeropuerto

Tiempo: Día soleado, muy buena visibilidad, 22°, brisa débil.

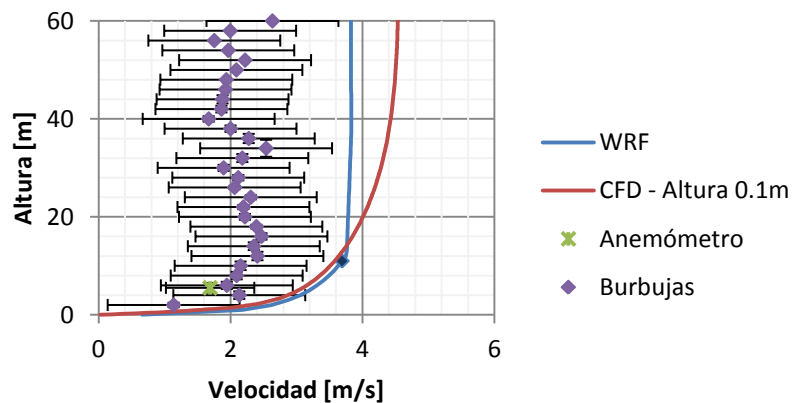
Escenario WRF para las 13:30 GMT



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



Comentarios: El perfil procedente del modelo de mesoescala se ve adaptado por su parte inferior a las características del terreno, mientras que en su parte superior elimina el pico de velocidad que se aprecia en el perfil del WRF.

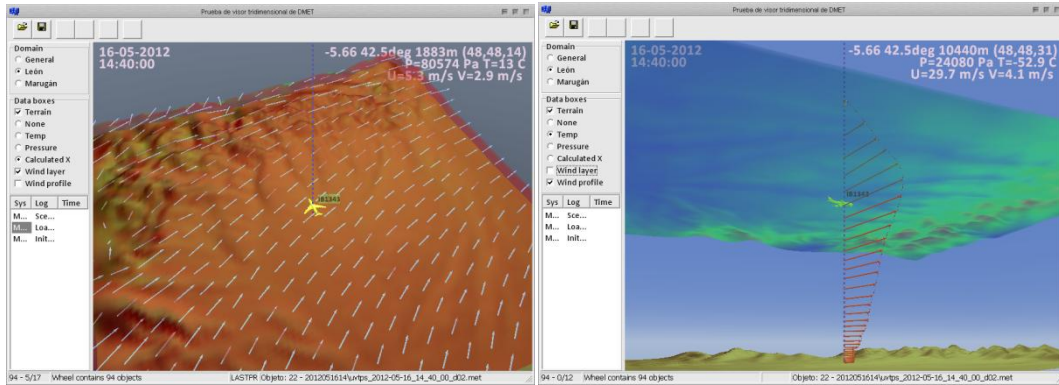
**Test 4**

Fecha: 16/05/2012, 16:46

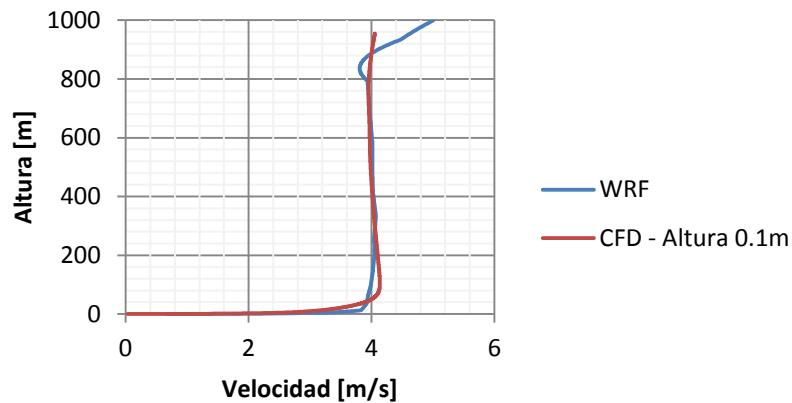
Ubicación: Aeropuerto

Tiempo: Día soleado, muy buena visibilidad, 26°, brisa débil.

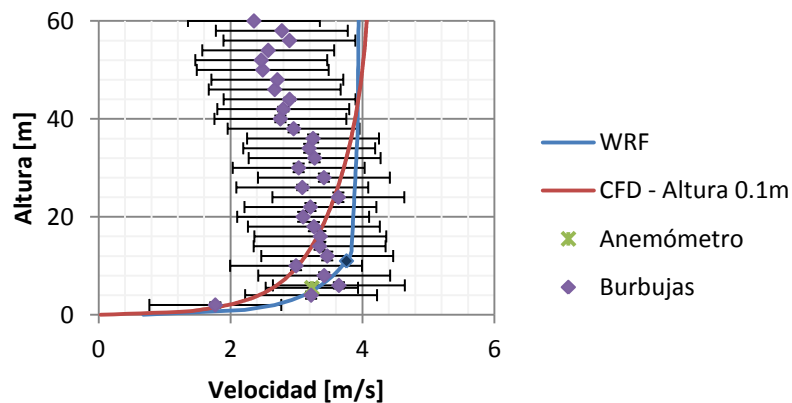
Escenario WRF para las 14:40 GMT



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



Comentarios: El perfil procedente del modelo de mesoescala se adapta ligeramente en su parte inferior a la mayor resolución del terreno, mientras que en su parte superior el código CFD genera unas formas más suaves y razonables con menos gradientes.

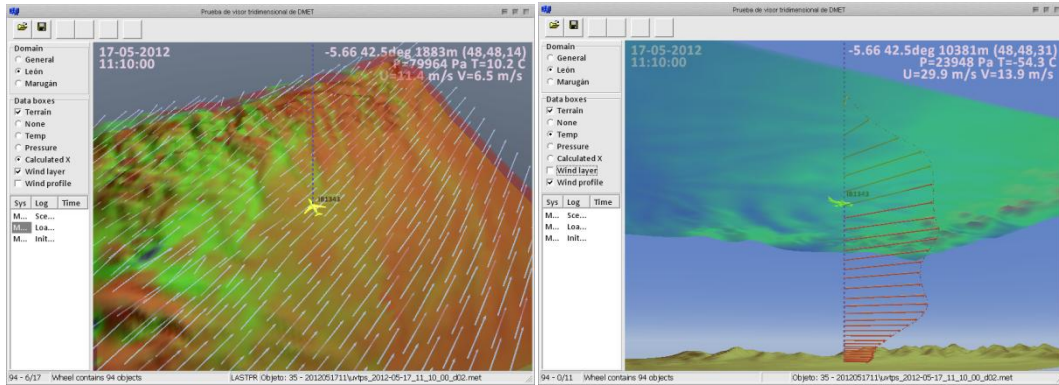
**Test 5**

Fecha: 17/05/2012, 13:09

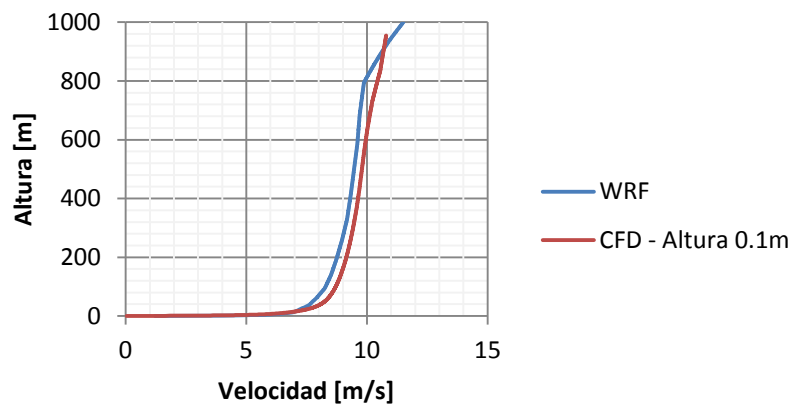
Ubicación: Aeropuerto

Tiempo: intervalos nubosos, muy buena visibilidad, 25°, brisa ligera.

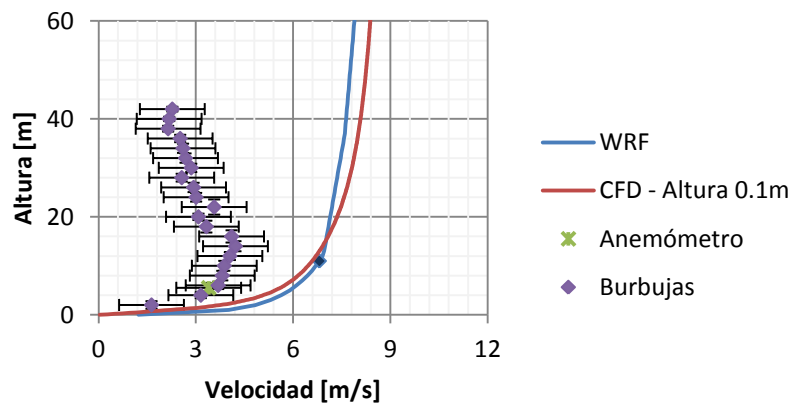
Escenario WRF para las 11:10 GMT



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



Comentarios: El perfil procedente del modelo de mesoescala se ve adaptado por su parte inferior a las características del terreno, mientras que en su parte superior el perfil de velocidades del CFD adopta unas formas más suaves y razonables.



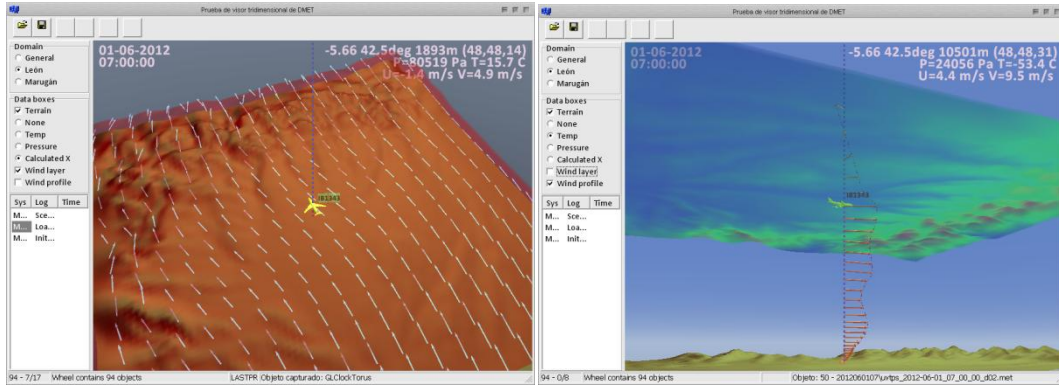
**Test 6**

Fecha: 01/06/2012, 9:00

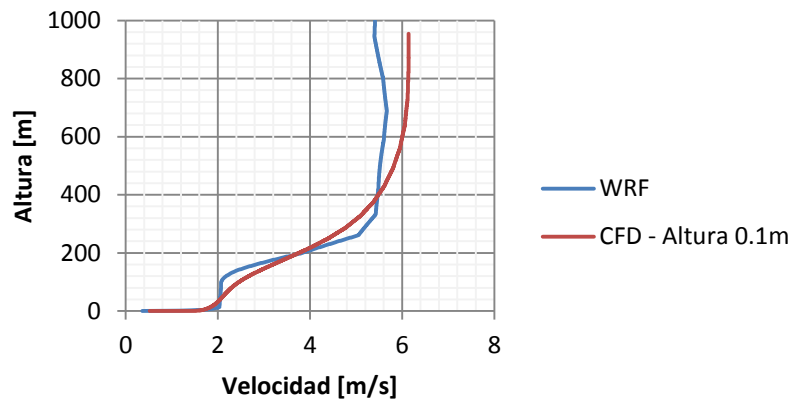
Ubicación: Aeropuerto

Tiempo: Día soleado, muy buena visibilidad, 26°, brisa débil.

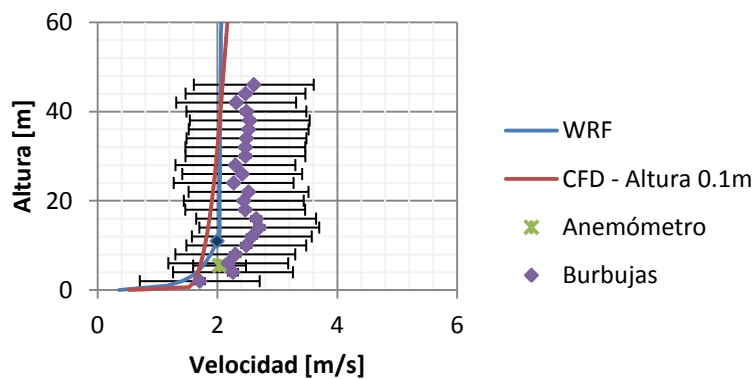
Escenario WRF para las 7:00 GMT



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



Comentarios: El perfil procedente del modelo de mesoescala es marcadamente escalonado, con un fuerte gradiente de velocidad entre los 200 y 400 metros que es convertido en el CFD en una pendiente más suave. Mediciones adicionales en esas alturas serían necesarias para comprobar el mejor resultado.



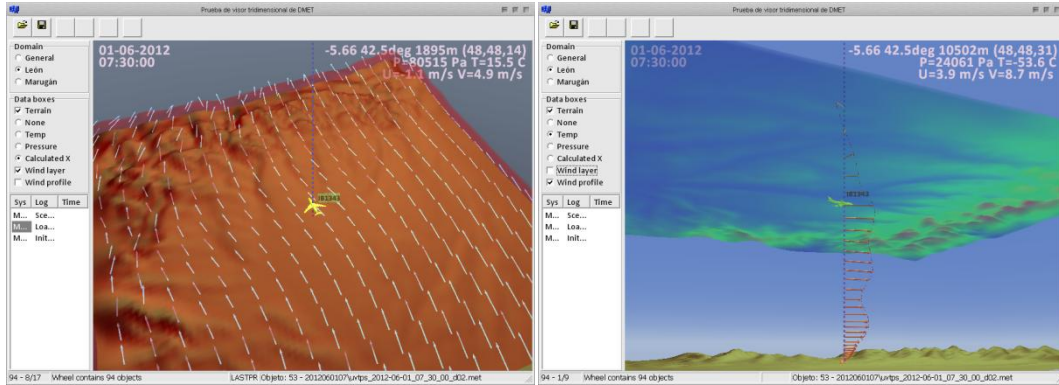
**Test 7**

Fecha: 01/06/2012, 9:25

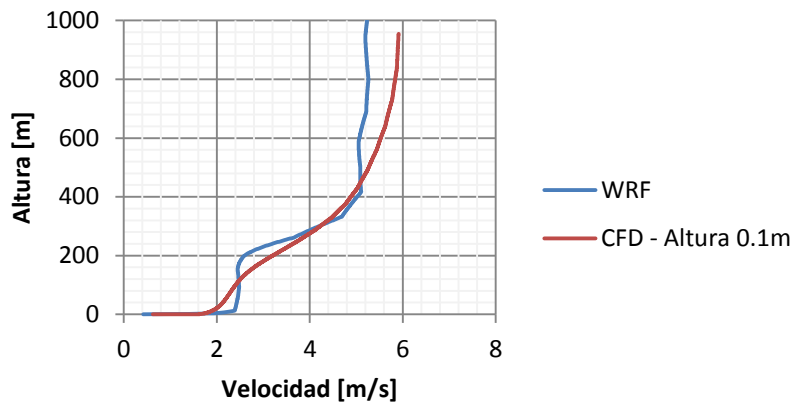
Ubicación: Aeropuerto

Tiempo: día soleado, muy buena visibilidad, 17°, brisa debil.

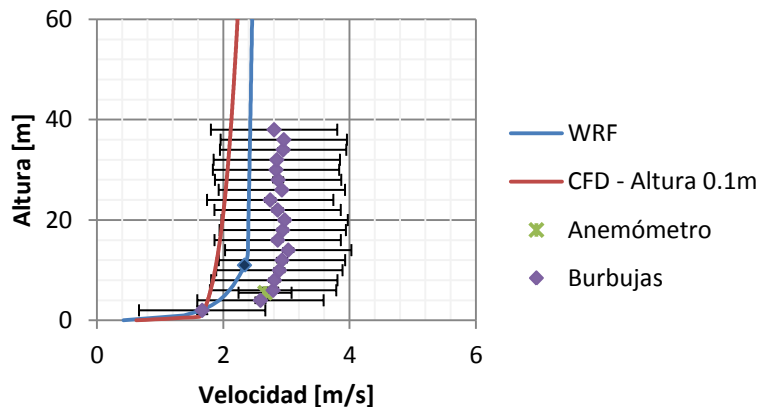
Escenario WRF para las 7:30 GMT



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



**Perfil WRF - CFD 0.1m - Mediciones**



Comentarios: El perfil procedente del modelo de mesoescala es marcadamente escalonado, con un fuerte gradiente de velocidad entre los 200 y 400 metros que es convertido en el CFD en una pendiente más suave. Mediciones adicionales en esas alturas serían necesarias para comprobar el mejor resultado.

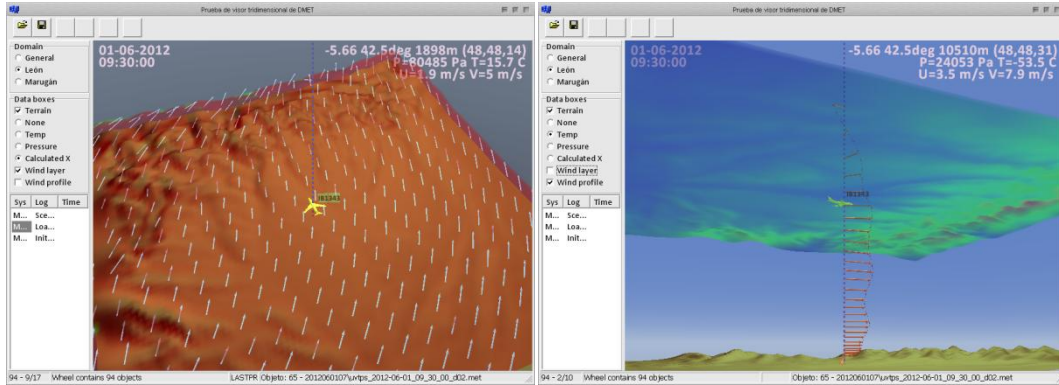
**Test 8**

Fecha: 01/06/2012, 11:34

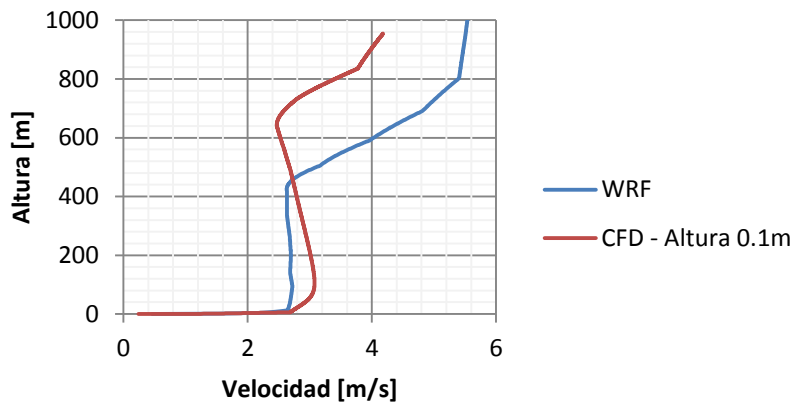
Ubicación: Aeropuerto

Tiempo: nublado, visibilidad media, 13°, brisa débil.

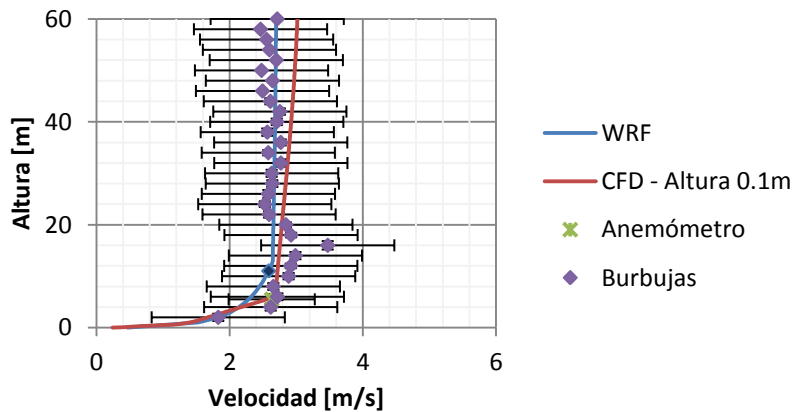
Escenario WRF para las 9:30 GMT



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



Comentarios: El perfil procedente del modelo de mesoescala muestra un fuerte cambio de velocidad por encima de los 400 metros que nos es seguido de la misma manera en el resultado del CFD. Mediciones adicionales a esa altura serían necesarias para determinar el mejor resultado y localizar posibles errores de modelado.

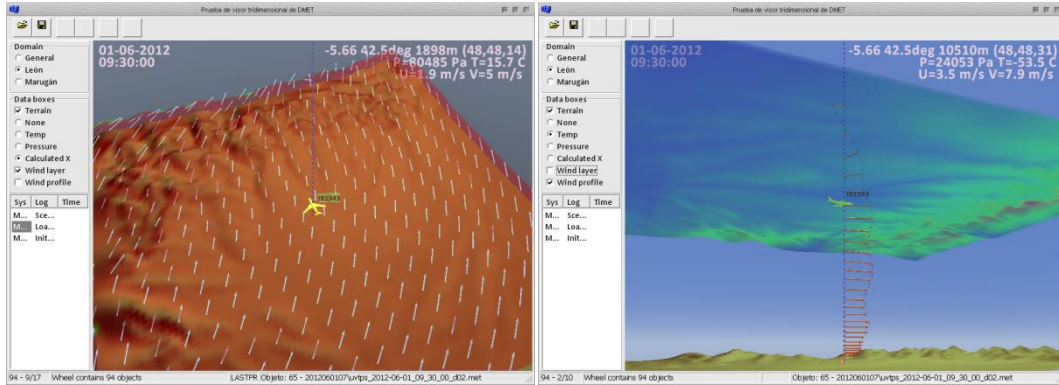
**Test 9**

Fecha: 01/06/2012, 12:44

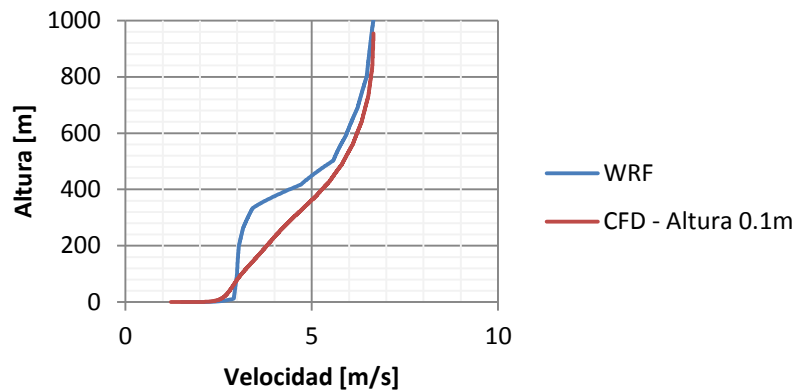
Ubicación: Aeropuerto

Tiempo: día soleado, muy buena visibilidad, 17°, brisa debil.

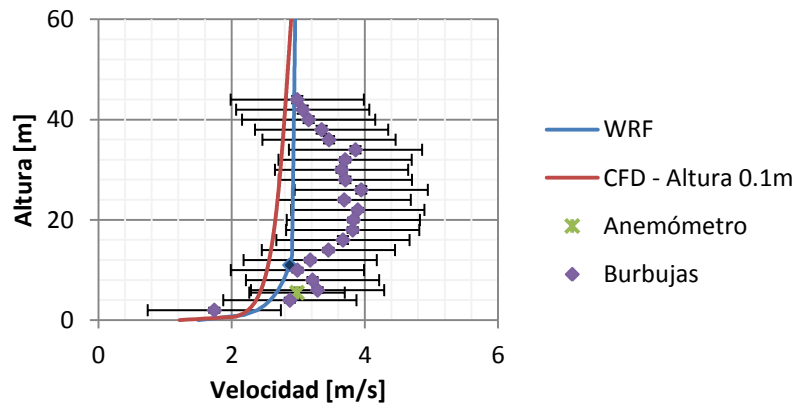
Escenario WRF para las 10:40 GMT



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



Comentarios: El perfil procedente del modelo de mesoescala muestra un cambio importante de velocidad por encima de los 350 metros que nos es seguido de la misma manera en el resultado del CFD, donde el cambio es gradual de inicio a fin. Mediciones adicionales a esas altura serían necesarias para determinar el mejor resultado y localizar posibles errores de modelado.

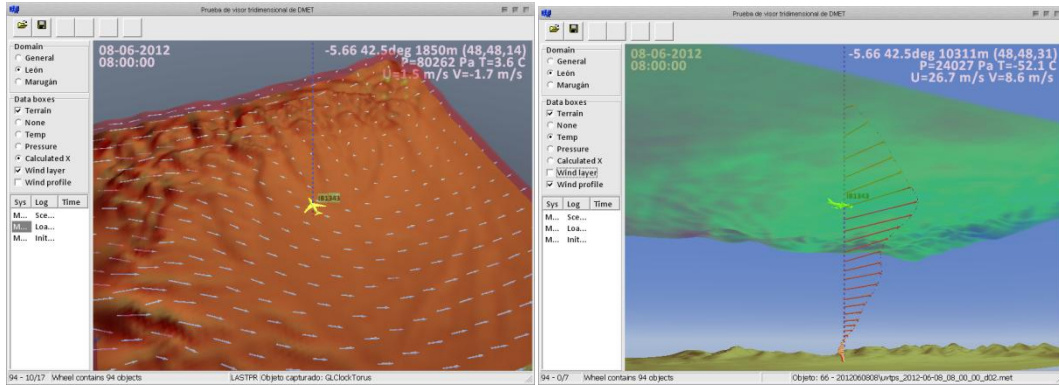
**Test 10**

Fecha: 08/06/2012, 9:57

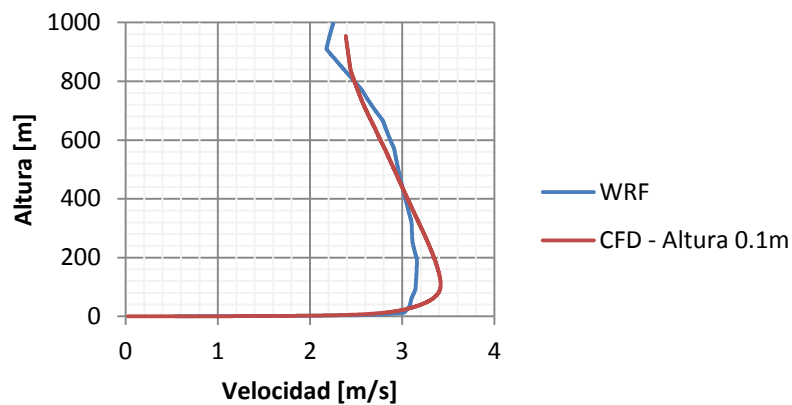
Ubicación: Aeropuerto

Tiempo: nublado, visibilidad media, 13°, brisa débil.

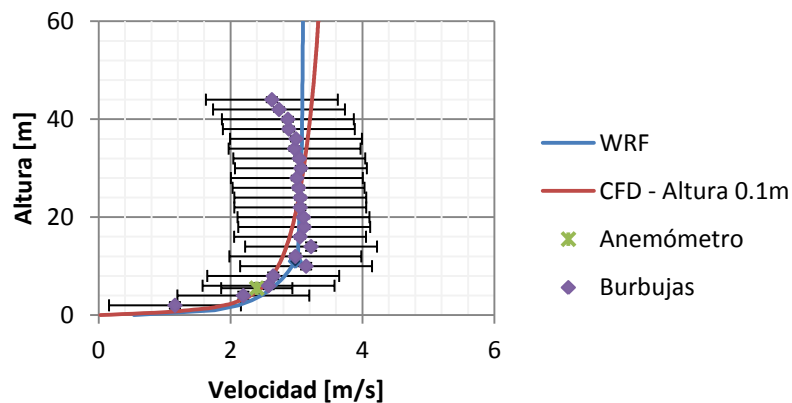
Escenario WRF para las 8:00 GMT



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



**Perfil WRF - CFD 0.1m - Mediciones**



Comentarios: El perfil procedente del modelo de mesoescala se ve adaptado por su parte inferior a las características del terreno, mientras que en su parte superior el perfil de velocidades del CFD adopta unas formas más suaves y razonables.

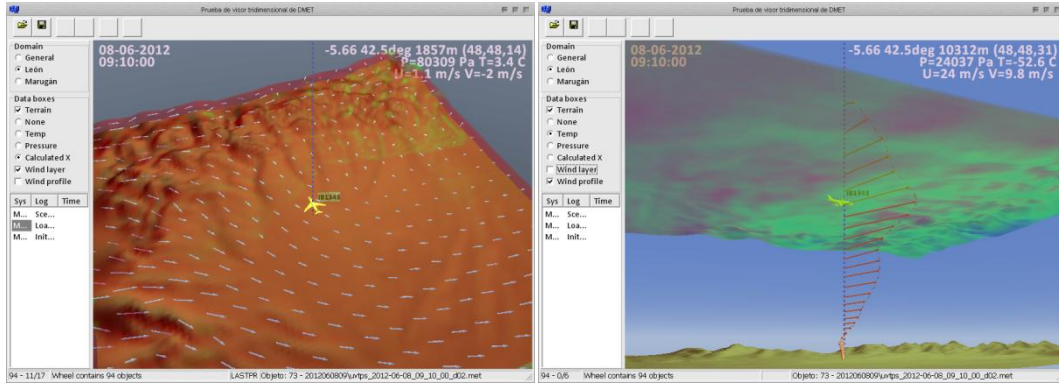
**Test 11**

Fecha: 08/06/2012, 11:15

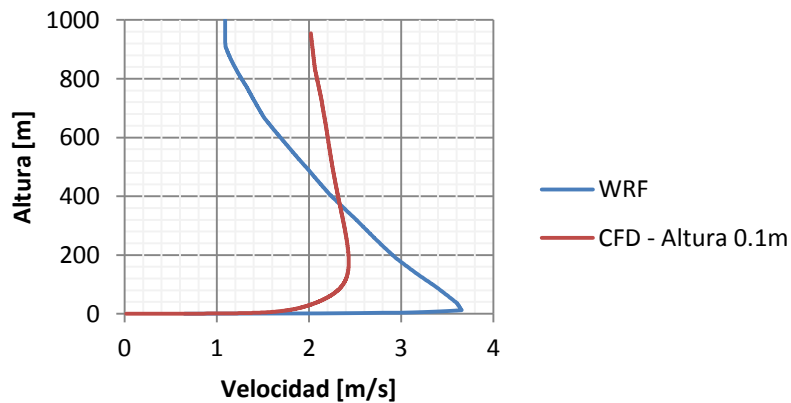
Ubicación: Aeropuerto

Tiempo: Día soleado, muy buena visibilidad, 22°, brisa débil.

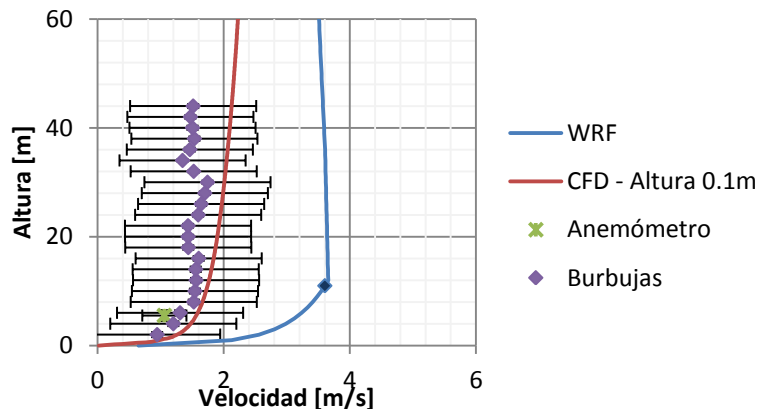
Escenario WRF para las 09:10 GMT



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



Comentarios: Mientras que en el perfil procedente del modelo de mesoescala la velocidad disminuye notablemente con la altura, este descenso resulta ser más suave en el resultado obtenido por el CFD. La diferencia es notable pero las mediciones encajan bien con el resultado del modelo CFD.

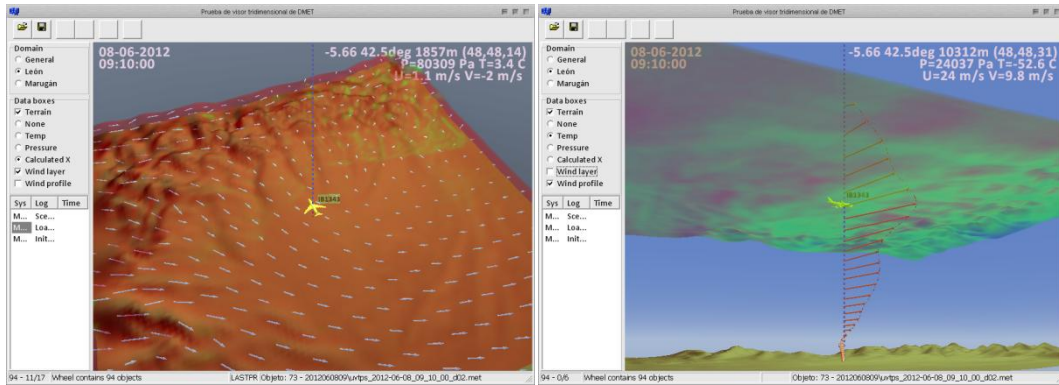
**Test 12**

Fecha: 08/06/2012, 12:27

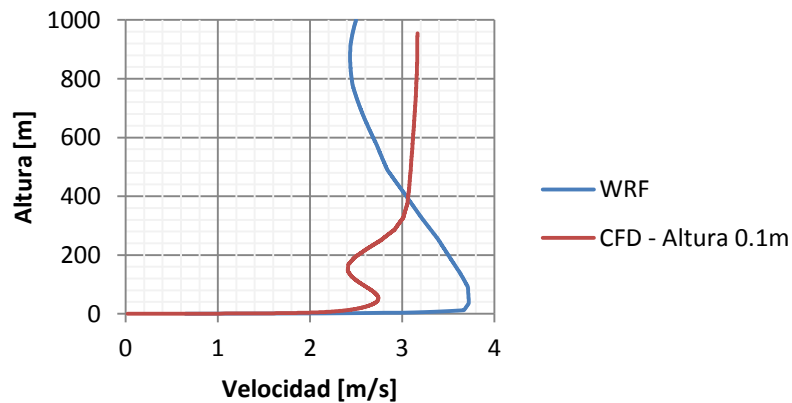
Ubicación: Aeropuerto

Tiempo: Día soleado, muy buena visibilidad, 26°, brisa débil.

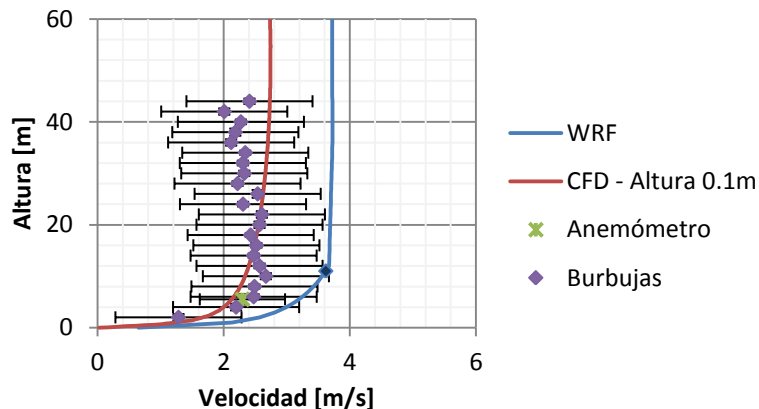
Escenario WRF para las 10:30 GMT



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



**Perfil WRF - CFD 0.1m**



Comentarios: Mientras que en el perfil procedente del modelo de mesoescala la velocidad disminuye notablemente con la altura, este descenso resulta ser más suave en el resultado obtenido por el CFD. La diferencia es notable pero las mediciones encajan bien con el resultado del modelo CFD.

A la vista de los resultados puede señalarse lo siguiente:

- En la mayor parte de los casos el resultado del CFD es coherente con aquellos conseguidos en el WRF, presentando a menudo modificaciones pequeñas. El perfil adquiere una forma más realista, con cambios de pendiente más suaves y progresivos que se asemejan más a los perfiles obtenidos mediante las mediciones.
- Como quedó demostrado en el apartado 5.2, los perfiles obtenidos con el modelo CFD son capaces de reflejar los cambios en la orografía, adaptándose a la misma en cada una de las zonas del dominio. Dado que la geometría de ensayo no es demasiado abrupta, no se aprecian grandes diferencias entre los modelos mesoescala y los de detalle local.
- En los ensayos 2, 3 y 5 se aprecia claramente que las mediciones y los perfiles del modelo numérico difieren notablemente. Como ya se indicaba en el anterior capítulo esto se debe fundamentalmente a las peculiares características del lugar y hora en que se realizaron los ensayos. Se trataba de días sin nubes, de gran calor y fuerte insolación, bajo estas condiciones la temperatura en la pista se vuelve realmente elevada durante las horas centrales del día y se forman importantes estructuras convectivas que modifican sustancialmente el perfil de vientos en las inmediaciones. Este fenómeno es recogido durante la toma de mediciones, ya que se realiza en las proximidades de la pista, pero no aparece reflejado ni en el modelo de mesoescala –cuya resolución no permite recoger la influencia de la pista– ni en el modelo CFD –donde por ahora no se ha implementado la variable temperatura y por tanto no se pueden modelar fenómenos convectivos–.
- En aquellas ocasiones en que los perfiles del CFD y WRF son más diferentes de lo habitual (test 11 y 12) se ha comprobado que se debe en buena medida a que el WRF presenta perfiles de viento notablemente distintos entre celdas adyacentes. Así, aquella en la que se encuentra el punto central de la pista del aeropuerto es distinta de aquella en la que se toma el perfil de entrada al dominio. Los cambios del perfil al atravesar el dominio CFD no son equiparable con los experimentados en el WRF, ahora bien, puesto que las mediciones obtenidas encajan con el perfil obtenido del CFD se considera que la solución obtenida es la adecuada.
- En ocasiones resulta difícil comparar directamente las mediciones recogidas mediante el sistema de seguimiento de burbujas y los perfiles obtenidos mediante la simulación. Mientras que las predicciones ofrecen valores medios, con una inercia importante que impide oscilaciones bruscas, las mediciones de campo obtenidas durante los ensayos ofrecen una mayor variabilidad temporal. Esto es mitigado en parte gracias a la metodología para la obtención de mediciones, las cuales se extraen del valor medio de las lecturas conseguidas durante la duración del ensayo.





## 6. CONCLUSIONES

---

El estudio e investigación de las condiciones atmosféricas, de las que forma parte muy importante el viento, descansa en dos actividades interrelacionadas, la observación-obtención de mediciones, y la simulación numérica para la obtención de predicciones. Ambas actividades se complementan entre sí, de tal manera que la obtención de mediciones permite la inicialización de las simulaciones, además de contribuir al desarrollo de modelos que permitan explicar los valores observados y realizar predicciones de mayor precisión.

De una parte, los modelos meteorológicos de mesoescala son capaces de predecir con muchas horas de antelación los campos de vientos globales y regionales, por otra, los modelos CFD permiten calcular los movimientos de los fluidos con un gran nivel de detalle y precisión, incluyendo así la orografía y otras características locales. De esta forma, uno de los objetivos básicos de la Tesis ha sido desarrollar la metodología y las herramientas necesarias para que ambos tipos de modelos puedan trabajar interconectados. El estudio de estas técnicas de acoplamiento ha experimentado un importante desarrollo en los últimos años, fundamentalmente por parte de grupos de investigación vinculados a la meteorología, es por ello que dichos intentos contienen ciertas simplificaciones y supuestos que pueden afectar notablemente el comportamiento del dominio de microescala ante diferentes condiciones de contorno y modelado. Son numerosos los esfuerzos que se han realizado a lo largo de la Tesis para cumplir con el objetivo marcado, habiéndose alcanzado las siguientes conclusiones:

- ✚ Se ha conseguido poner en funcionamiento como parte de los recursos del Grupo de Investigación en Tecnología Aeroespacial un sistema de predicción meteorológica de mesoescala, capaz de proporcionar predicciones continuas en formato digital con las variables adecuadas para inicializar las simulaciones de microescala.
- ✚ Se han desarrollado las herramientas software necesarias para la discretización de los dominios de microescala y la inserción de las variables de velocidad y turbulencia en el mismo. La velocidad es muestreada directamente de la salida del modelo de mesoescala, así como la energía cinética de la turbulencia TKE, proporcionada por el modelo de capa límite planetaria elegido (MYNN). Por su parte para el cálculo de la disipación viscosa las referencias ofrecían diversas posibilidades, se ha optado por calcularla a partir de la hipótesis de equilibrio entre producción y disipación de la turbulencia.
- ✚ Los códigos numéricos estándar que incluyen los programas CFD se ha revelado inadecuados para la simulación de la capa límite planetaria, especialmente en lo que se refiere a las variables turbulentas. Por ello se ha modificado el modelo de turbulencia k-epsilon del código CFD para conseguir un correcto modelado de la velocidad y la turbulencia en la capa límite. Se han podido validar los resultados mediante simulaciones en dominios vacíos en los que se conseguía un equilibrio horizontal para los perfiles.
- ✚ Se han realizado de forma satisfactoria simulaciones cuyo dominio lo constituye un cubo de lado 6 km, centrado en el Aeropuerto de León, y altura 1000 m sobre el terreno. Los valores de contorno para las variables son importados del modelo de mesoescala. Se han realizado las simulaciones necesarias para validar el correcto funcionamiento del modelo ante diversas condiciones de viento y para definir la discretización del dominio más eficiente.
- ✚ Se ha comprobado que los resultados de las simulaciones de un dominio de microescala acoplado ofrecen una mayor precisión (por comparación con las lecturas sobre el terreno) que las del modelo de mesoescala.

El gran tamaño del modelo numérico de CFD, con dominios cuyo número de celdas alcanza los varios millones, obliga a disponer de grandes recursos de cálculo para poder realizar las simulaciones en periodos de tiempo razonables. En el caso de la presente tesis se ha utilizado el acceso concedido por la Fundación Centro de Supercomputación de Castilla y León a los recursos de cálculo adecuados.

Como se ha expuesto en reiteradas ocasiones, las mediciones son una herramienta esencial para complementar la realización de simulaciones numéricas capaces de predecir el viento existente en una determinada zona. Aparte de las observaciones satelitales, la realización de mediciones in situ de los campos de viento requiere habitualmente del despliegue en la zona de interés de complejos y costosos instrumentos. En el caso de que únicamente se desee obtener mediciones de un punto próximo al suelo, los instrumentos necesarios pueden resultar más asequibles; pero cuando se trata de obtener mediciones

de los perfiles de velocidad en altura las tecnologías disponibles<sup>12</sup> presentan varios inconvenientes, siendo el principal el alto coste de los equipos (suelen superar los 60.000€). Además, la instalación de los mismos suele presentar problemas añadidos en cuanto a servidumbres. Ante tales circunstancias, uno de los objetivos de esta tesis ha sido el desarrollo de un nuevo sistema, asequible económicamente, que fuera capaz de obtener dichas mediciones del viento en altura y sin interferencia con el tráfico aéreo. Con respecto a este objetivo marcado inicialmente es posible concluir que:

- ✚ Ha sido posible especificar la arquitectura y principios de funcionamiento de un sistema de medición del viento basado en el seguimiento de aglomerados de burbujas más ligeras que el aire.
- ✚ Las simulaciones numéricas llevadas a cabo mediante un modelo del sistema permitieron confirmar la validez de sus principios de funcionamiento, que permiten inferir con precisión la velocidad de los blancos a partir de sus posiciones angulares con respecto a las cámaras de seguimiento.
- ✚ Ha sido posible elaborar una versión de desarrollo del sistema, la cual ha podido ser desplegada con éxito en los terrenos de la Academia Básica del Aire – Aeropuerto de León, para la realización de pruebas en condiciones reales de utilización y validación de los modelos de predicción de esta Tesis.
- ✚ Las mediciones obtenidas por el sistema propuesto durante las pruebas de campo han podido ser contrastadas con los datos recogidos por los sistemas de tierra y las predicciones de los modelos, mostrando una precisión aceptable en los puntos donde se disponía de la verdad-terreno.

Teniendo en cuenta estos datos, y aunque el desarrollo de una versión operacional necesita de trabajos adicionales, fundamentalmente los relacionados con el post-procesado de las imágenes y la elaboración de los conglomerados, se puede concluir que se ha conseguido desarrollar una versión con capacidad operativa inicial que proporciona información valiosa relativa a la velocidad y dirección del viento en la primera capa atmosférica. Estas medidas de intensidad y dirección contribuyen en gran medida a la precisión de los modelos microescala desarrollados.

A la vista del trabajo recogido en los apartados previos y de las conclusiones aquí expuestas, parece meridianamente claro que se han alcanzado los objetivos planteados inicialmente. Se ha mejorado la técnica existente para la obtención de mediciones de campos de viento y se ha conseguido mejorar la predicción y simulación de los mismos gracias a una metodología y unas herramientas innovadoras.

---

<sup>12</sup> Básicamente LIDAR, SODAR y RADAR, para más información consultar 2.3.4, 2.3.5 y 2.3.3 respectivamente.

### 6.1. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

Aunque el modelo acoplado que se recoge en esta tesis ofrece unos buenos resultados, es posible complementarlo con una serie de nuevas prestaciones que mejoren y amplíen sus capacidades para simular todo tipo de condiciones de la capa límite atmosférica:

- ✚ Incorporación de la variable temperatura en el terreno y el fluido, de esta forma se podrían modelar los efectos de empuje producidos como consecuencia de las diferencias de temperatura entre regiones del fluido.
- ✚ Incorporación de edificios y otras estructuras para analizar la interacción mutua entre ellos y la capa límite atmosférica.
- ✚ Transporte y dispersión de especies a través de la atmósfera.
- ✚ Adaptación del modelo para su uso en el estudio de parques eólicos mediante la incorporación de técnicas que permitan reproducir el efecto de las palas sobre el flujo.

## 7. CONCLUSIONS

---

Study and research about atmospheric conditions, including wind as a major element, is performed by means of two interrelated activities: taking measurements thanks to observations and making predictions with numerical simulations. Both activities are complementary between them, getting measurements of the real state of the atmosphere allow to initialize simulations. Also, these measurements contribute to develop and improve numerical models that can explain observed values and make more accurate predictions.

On the one hand, mesoscale meteorological models are able to predict several hours in advance regional and global wind fields, on the other hand, CFD models can calculate fluid movements with high detail and accuracy, including terrain orography and manmade features. In such a way, one of the objectives of this Thesis has been developing the tools and methodology needed in order to allow both models to work in a coupled way. The study of these coupling techniques has experienced a major boost during the last years, mainly thanks to research groups interested in meteorology. Due to this reason, most of these attempts include some simplifications and assumptions that can notably influence microscale model performance. Many efforts have been put in trying to achieve proposed objective and it is possible to conclude the following:

- ✚ It was possible to implement a meteorological mesoscale model in the Aerospace Research Group facilities. It is able to continuously provide digital meteorological

- scenarios with all needed variables to be used as initial and boundary conditions for the microscale model.
- ✚ Software tools needed for domain discretization and variable assimilation has been developed. Speed and turbulent kinetic energy (TKE) are directly interpolated from the mesoscale output, the TKE is provided thanks to MYNN boundary layer model. Viscous dissipation ( $\epsilon$ ) could be calculated in different ways, the selected option has been considering equilibrium between turbulent production and dissipation.
  - ✚ Standard numerical codes included in CFD programs have shown to be inadequate in order to properly modeling atmospheric boundary layer. For this reason, *k-epsilon* turbulence model has been modified to get a right modeling of velocity and turbulence in the boundary layer. Results have been validated thanks to empty domain simulations, where horizontal equilibrium for velocity and turbulent profiles was achieved.
  - ✚ Simulations involving León Airport surroundings have been successfully conducted. The domain is a cube 6km length and 1km height. Boundary conditions for wind speed and turbulence are provided by the mesoscale model. Many simulations have been done in order to check the model under different wind conditions and look for the most efficient domain meshing.
  - ✚ The microscale coupled model offers a greater accuracy than the mesoscale meteorological model alone when both outputs are checked with available ground truth.

The big size of the CFD model, whose cell number is several millions, implies that a lot of computational resources should be used for getting the results in a reasonable period of time. In this Thesis, most of the computational work has been done in a super-computer which belongs to Fundación Centro de Supercomputación de Castilla y León.

As it has been previously pointed, measurements are a crucial tool complementing numerical simulations that are able to predict existing wind in a certain region. Besides satellite observations, taking *in situ* measurements of wind requires deploying in the studied area complex and expensive instruments. Just in case it is wanted to obtain measures of a near-land point, instruments required are affordable. However, when taking measurements of velocity profiles at different heights is needed, available technologies present several disadvantages, being the principal of them the high cost of the equipment (it usually exceeds 60,000€). Furthermore, the equipment installation usually presents important problems. Under this circumstances, one of the main objectives of the present dissertation was trying to develop an affordable new system capable of getting the required measurements of wind speed at different heights. According to this initially established objective, it is possible to conclude the following:

- ✚ It has been possible to specify the architecture and running basics of a wind measurement system based on tracking lighter than air bubble clusters.
- ✚ Numerical simulations, run thanks to a mathematical model of the system, made possible to confirm its ability to deduce the velocity of the target starting from angular positions regarding to tracking cameras.

- ✚ It has been possible to elaborate a system development version which has been successfully deployed at León Airport - Air Force Base to conduct trials on real use conditions.
- ✚ Measurements obtained with the proposed system during field tests have been contrasted with available ground measurements provided by instruments deployed with the system and the model predictions. The system showed an adequate accuracy at those points where ground truth was available.

Taking into account this information, although an operational version of the system requires additional work about images post-processing and automated bubble making, it can be concluded that an initial operational capability system has been developed. It is able to provide valuable data about wind speed and direction in the atmospheric boundary layer. This data can contribute to improve numerical models accuracy as well as check their results.

Thanks to the carried out work, it is patent that proposed objectives have been reached. The previously existing knowledge about measurement and numerical prediction of wind fields has been improved thanks to the innovative tools and methodologies proposed in this Thesis.

## 7.1. FUTURE RESEARCH WORK

The coupled model presented in this thesis offers an interesting performance; nevertheless, it is possible to upgrade it with some new capabilities that would improve and increase its ability modeling any atmospheric boundary layer:

- ✚ Include terrain and fluid temperature into the model. Doing that it would be possible to model buoyancy processes due to temperature gradients within the fluid.
- ✚ Include buildings and other structures in order to study mutual interaction between these features and the atmospheric boundary layer.
- ✚ Modify the model including features to reproduce the effect of wind turbine blades, allowing to study wind farms and turbine sitting problems.
- ✚ Include particle dispersion modeling capability.





---

## BIBLIOGRAFÍA

Ahrens, C. Donald. *Essential of meteorology. An invitation to the atmosphere*. Belmont, USA: Cengage Learning, 2008.

Allaby, Michael. *Encyclopedia of weather and climate*. New York: Facts on File, 2002.

Anderson, John D. Jr. *Computational fluid dynamics*. New York : McGraw-Hill , 1995.

Angelova, Donka, and Lyudmila Mihaylova. "Joint target tracking and classification with particle filtering and mixture Kalman filtering using kinematic radar information." *Digital Signal Processing* 16, 2006: pp. 180-204.

Australian Government, Bureau of Meteorology. [http://www.bom.gov.au/weather/radar/about/doppler\\_wind\\_images\\_intro.shtml#intro](http://www.bom.gov.au/weather/radar/about/doppler_wind_images_intro.shtml#intro) (accessed 2011).

Baik, Jong-Jin, Seung-Bu Park, and Jae-Jin Kim. "Urban flow and dispersion simulation using a CFD model coupled to a mesoscale model." *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 2009: pp. 1667-1681.

Barker, D. M., Y.-R. Guo, W. Huang, and X.N. Xiao. "A Three-Dimensional Variational Data Assimilation System for MM5: Implementation and Initial Results." *Mon. Wea. Rev.*, 132, 2004: pp: 897-914.

Behrens, Tim. "OpenFOAM's basic solvers for linear systems of equations." Febrero 18, 2009.

Bitsuamlak, G. T., T. Stathopoulos, and C. Bedard. "Numerical evaluation of wind flow over complex terrain: review." *Journal of Aerospace Engineering* 17 (4), 2004: pp. 145-245.

Blocken, Bert, Ted Stathopoulos, and Jan Carmeliet. "CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems." *Atmospheric Environment*, 41, 2007: pp. 238-252.

Borge, Rafael, Vassil Alexandrov, Juan José Del Vas, Julio Lumbreras, and Encarnación Rodríguez. "A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula." *Atmospheric Environment*, 42, 2008: pp. 8560-8574.

Bougeault, P., and P. Lacarrère. "Parameterization of orography-induced turbulence in a mesoscale model." *Monthly Weather Review*, 117, 1989: pp. 1872-1890.

Boussinesq, J. "Théorie de l'écoulement tourbillant." *Mem. Présentés par Divers Savants Acad. Sci. Inst.*, 23. París, 1877.

Boybeyi, Z., et al. "Evaluation of the Operational Multiscale Environment Model with Grid Adaptivity against the European Tracer Experiment." *Journal of Applied Meteorology*, 40, 2001: pp. 1541-1558.

Cebeci, T., and P. Bradshaw. *Momentum transfer in Boundary Layers*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1977.

Chou, S. C., J. F. Bustamante, and J. L. Gomes. "Evaluation of seasonal precipitation forecasts over South America using Eta model." *Nonlin. Proc. Geophys.*, 12, 2005: pp. 537-555.

Cimini, Domenico, Frank S. Marzano, and Guido Visconti. *Integrated Ground-Based Observing Systems*. Berlin: Springer, 2010.

Daley, Roger. *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

Date, Anil Wanam. *Introduction to Computational Fluid Dynamics*. New York : Cambridge University Press , 2009.

Dave, Gill, and Matthew Pyle. "Nesting in WRF." 2012.

Domínguez Fernández, Diego, Deibi López Rodríguez, and Jesús Gonzalo de Grado. "OpenFOAM as Free CFD Tool for Education, Research and Design in UAS." *I Workshop on Research, Development and Education on Unmanned Aerial Systems*. Sevilla, 2010.

EADS Astrium. "Aeolus - All the space you need." 2009.

Emeis, Stefan. *Surface based remote sensing of the atmospheric boundary layer*. Dordrecht: Springer, 2011.

Emeis, Stefan, Christoph Munkel, Siegfried Vogt, Wolfgang J. Müller, and Klaus Schäfer. "Atmospheric boundary-layer structure from simultaneous SODAR, RASS, and ceilometer measurements." *Atmospheric Environment Volume 38*, 2004: 273 - 286.

European Topic Centre on Air and Climate Change. *Long description of model 'RAMS-CEAM'*. 2010. <http://pandora.meng.auth.gr/mds/showlong.php?id=186>.

Franke, J., A. Hellsten, H. Schlunzen, and B. Carissimo. "Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment." *COST Action 732*. 2007.

Franke, J., et al. "Recommendations on the use of CFD in wind engineering." *Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics*. Sint-Genesius-Rode, Belgium: van Beeck JPAJ, 2004.

Fujii, Takashi, and Tetsuo Fukuchi. *Laser Remote Sensing*. Boca Raton, FL (USA): CRC Press, 2005.

Gorlé, C., J. van Beeck, P. Rambaud, and G. Van Tendeloo. "CFD modelling of small particle dispersion: The influence of the turbulence kinetic energy in the atmospheric boundary layer." *Atmospheric Environment*, 43, 2009: pp. 673-681.

- Grewal, Mohinder S., and Angus P. Andrews. *Kalman filtering. Theory and practice using MATLAB*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- Hargreaves, D. M., and N. G. Wright. "On the use of the k epsilon model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 29, 2007: pp. 355-369.
- Holtslag, A. A. M., and B. A. Boville. "Local versus non-local boundary layer diffusion in a global climate model." *Journal of Climate*, 6, 1993: pp. 1825-1842.
- Hong, S.-Y., and H.-L. Pan. "Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model." *Monthly Weather Review*, 124, 1996: 2322-2339.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhi. "A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes." *Monthly Weather Review*, 134, 2006: pp. 2318-2341.
- Huang, X.-Y., and P. Lynch. "Diabatic digital filter initialization: Application to the HIRLAM model." *Monthly Weather Review*, 121, 1993: pp. 589-603.
- Isenberg, Cyril. *The science of soap films and soap bubbles*. New York: Dover Publications, 1992.
- Janjic, Z. I. "Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model." NCEP Office Note n° 437, 2002.
- Jasak, Hrvoje. "Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows." Imperial College, London: Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, 1996.
- Johnson, Hakeem K. "Simple Expressions for correcting wind speed data for elevation." *Coastal Engineering* 36, 1999: pp. 263-269.
- Jwo, Dah-Jing, and Ta-Shun Cho. "A practical note on evaluating Kalman filter performance optimality and degradation." *Applied Mathematics and Computation* n193, 2007: pp. 482-505.
- Kalman, R. E. "A new approach to linear filtering and prediction problems." *Journal of Basic Engineering* 82D, 1960.
- Kim, J.-J., and J.-J. Baik. "A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG k-epsilon turbulence model." *Atmospheric Environment*, 38, 2004: pp. 3039-3048.
- Klemp, J. B., W. C. Skamarock, and J. Dudhia. "Conservative split-explicit time integration methods for the compressible nonhydrostatic equations." *Monthly Weather Review*, 135, 2007: pp. 2897-2913.
- Kurekov, Oleksiy. "Automatic Wall Functions for RANS computation in OpenFOAM." *Open Source CFD Conference*. Barcelona, Noviembre 2009.

Lam, C. K. G., and K. A. Bremhorst. "Modified Form of the k-epsilon Model for Predicting Wall Turbulence." *Journal of Fluids Engineering*, 103, 1981: pp. 456-460.

Landberg, L. "Short-term prediction of the power production from windfarms." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 80, 1999: pp. 207-220.

Laprise, R. "The Euler Equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable." *Monthly Weather Review*, 120, 1992: 197-207.

Launder, B. E., and B. I. Sharma. "Application of the Energy-Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow near a Spinning Disc." *Letters of Heat and Mass Transfer*, 1, 1974: pp. 131-137.

Launder, B. E., and D. B. Spalding. "The numerical computation of turbulent flows." *Computer Methods and Applied Mechanics and Engineering*, 3, 1974: pp. 269-289.

Li, L., et al. "Study on the microscale simulation of wind field over complex terrain by RAMS/FLUENT modeling system." *CWE2010*. Chapel Hill, NC., 2010.

Liu, Yubao, Alfred Bourgeois, Tom Warner, and Scott Swerdlin. "An "observation-nudging"-based FDDA for WRF-ARW for mesoscale data assimilation and forecasting." *Fourth Symposium on Space Weather*. 2007.

Liu, Yubao, et al. "Simultaneous nested modeling from the synoptic scale to the LES scale for wind energy applications." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99, 2011: pp. 308-319.

Lynch, P., and X.-Y. Huang. "Diabatic initialization using recursive filters." *Tellus*, 46A, 1994: pp. 583-597.

Lynch, P., and X.-Y. Huang. "Initialization of the HIRLAM model using a Digital Filter." *Monthly Weather Review*, 120, 1992: pp.1019-1034.

Lynch, P., D. Giard, and V. Ivanovici. "Improving the efficiency of a digital filtering scheme for diabatic initialization." *Monthly Weather Review*, 125, 1997: pp. 1976-1982.

Machenhauer, B. "On the dynamics of gravity oscillations in a shallow-water model with applications to normal mode initialization." *Contributions to Atmospheric Physics*, 50, 1977: pp. 253-271.

Mahapatra, Pravas R. *Aviation weather surveillance systems : advanced radar and surface sensors for flight safety and air traffic management*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.

Manasseh, Richard, and Jason H. Middleton. "The surface wind gust regime and aircraft operations at Sydney Airport." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 79, 1999: pp. 269-288.

Mathews, E. H. "Prediction of the wind-generated pressure distribution around buildings." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 25, 1987: 219-228.

- Meischner, Peter. *Weather radar: principles and advanced applications*. Berlin: Springer, 2004.
- Mellor, G. L. "Analytic prediction of the properties of stratified planetary surface layers." *Journal of the Atmospheric Sciences*, 30, 1973: pp. 1061-1069.
- Mellor, G. L., and T. Yamada. "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems." *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 20, 1982: pp. 851-875.
- Meseguer Ruiz, José, Ángel Sanz Andrés, José Manuel Perales Perales, and Santiago Pindado Carrión. *Aerodinámica Civil: Cargas de viento en las edificaciones*. Madrid: McGraw-Hill, 2001.
- Mesinger, F. "The Arakawa approach, horizontal grid, global, and limited-area modeling." In *General Circulation Model Development: Past, Present and Future.*, by David A. Randall, pp. 373-419. Academic Press, 2000.
- Mochida, A., K. Sasaki, T. Iwata, N. Hataya, and H. Yoshino. "Effects of roadside trees on thermal environment and pollutant diffusion in street canyon." *European & African Conference on Wind Engineering*. 2005.
- Mochida, Akashi, Satoru Iizuka, Yoshihide Tominaga, and Isaac Yu-Fat Lun. "Up-scaling CWE models to include mesoscale meteorological influences." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99, 2011: pp. 187-198.
- Moeng, C.-H., Jimmy Dudhia, Joe Klemp, and Peter Sullivan. "Examining two-way grid nesting for Large Eddy Simulation of the PBL using the WRF Model." *American Meteorological Society*, 2007: pp. 2295-2311.
- Naderi, F., M. H. Freilich, and D. G. Long. "Spaceborne Radar Measurement of Wind Velocity Over the Ocean-- An Overview of the NSCAT Scatterometer System." *Proceedings of the IEEE*, 1991: pp. 850-866, Vol. 79, No. 6.
- Nakanishi, Mikio. "Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on large-eddy simulation data." *Boundary-Layer Meteorology*, 99, 2001: pp. 349-378.
- Nakanishi, Miko, and Hiroshi Niino. "An improved Mellor-Yamada Level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog." *Boundary-Layer Meteorol*, 119, 2006: pp. 397-407.
- National Aviation Weather Services Committee, National Research Council. *Aviation weather services: a call for federal leadership and action*. National Academies Press, 1995.
- National Center for Atmospheric Research. "Weather Research & Forecasting." *ARW, Version 2 Modeling System User's Guide*. National Center for Atmospheric Research, January 2008.
- Nava, Enzo, and Emanuele Stucchi. "Development of lasers for spaceborne Doppler wind lidar applications." *Optics and Lasers in Engineering* 39, 2003: 255-263.

Naval Research Laboratory. "COAMPS. Model description: General Theory and Equations." Monterey, California, 2003.

Newman, J. F., D. S. LaDue, and P. L. Heinselman. "Identifying critical strengths and limitations of current radar systems." *24th Conference on Severe Local Storms*. Savannah, GA: American Meteorological Society, 2008.

Nikuradse, J. "Strömungsgesetze in rauhen Rohren." *Forschung Arb. Ing.-Wes.*, 136, 1933.

Noh, Y., W. G. Cheon, S.-Y. Hong, and S. Raasch. "Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data." *Boundary Layer Meteorology*, 107, 2003: pp. 401-427.

OpenCFD Limited. *OpenFOAM, The Open Source CFD Toolbox. User Guide V 2.0.0*. 2011.

Parente, A., and C. Benocci. "On the RANS simulations of neutral ABL flows." *Proceedings of the Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*. Chapel Hill, North Carolina, USA, 2010.

Parente, A., C. Górlé, J. van Beeck, and C. Benocci. "Improved k-epsilon model and wall function formulation for the RANS simulation of ABL flows." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99, 2011: pp: 267-278.

Patankar, S. V., and D. B. Spalding. "A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-dimensional Parabolic Flows." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, 1972.

Peckham, Steven, et al. "Implementation and testing of WRF DFI." *9th annual WRF User's Workshop*. 2008.

Pedruelo Tapia, Xavier. *Modelling of wind flow over complex terrain using OpenFOAM. Mater's Thesis*. Junio 2009.

Pérez, I. A., M. A. García, M. L. Sánchez, and B. de Torre. "Analysis and parameterisation of wind profiles in the low atmosphere." *Solar Energy* 78, 2005: pp. 809-821.

Pielke, Roger A. *Mesoscale meteorological modeling*. San Diego : Academic Press , 2002.

Pleim, J. E. "A combined local and non-local closure model for the atmospheric boundary layer. Part 1: Model description and testing." *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 2007: pp. 1383-1395.

Pontiggia, M., M Derudi, V. Busini, and R. Rota. "Hazardous gas dispersion: A CFD model accounting for atmospheric stability classes." *Journal of Hazardous Materials*, 171, 2009: pp. 739-747.

Pope, S. B. *Turbulent flows*. Cambridge; Madrid : Cambridge University Press , 2009.

Renewable Energy Research Laboratory. *Center for Energy Efficiency & Renewable Energy, University of Massachusetts*. <http://www.ceere.org/rerl/projects/mettower/mettower.html> (accessed 2011).

Richards, P. J., and B. A. Younis. "Comments on "prediction of the wind-generated pressure distribution around building" by E.H. Mathews." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 34, 1990: pp. 107-110.

Richards, P. J., and R. Hoxey. "Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k epsilon turbulence model." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46, 47, 1993: pp. 145-153.

Richards, P. J., and S. E. Norris. "Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99, 2011: pp. 257-266.

Rong Li, X., and Vesselin P. Jilkov. "A survey of maneuvering target tracking: Dynamic models." 4048-22. Orlando, FL, USA: Proceedings of SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets, April 2000.

Salguero, C., and J. Gonzalo. "Advances in Digital Meteorological Services (DMET) for Air Traffic Management." *SESAR Innovation Days*. 2011.

Sánchez-Perrino, J. C., et al. "WRF simulations of the Atmospheric Boundary Layer over homogeneous terrain: representation of nocturnal processes." *Geophysical Research Abstracts*, 13, 2011.

Sanz-Andres, A., and A. Cuerva. "Pedestrian wind comfort: Feasibility study of criteria homogenisation." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94, 2006: pp. 799-813.

Schlunzen, K. H., et al. "Flow and transport in the obstacle layer: first results of the microscale mode IMITRAS." *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2003: pp. 113-130.

Schlünzen, K. Heinke, David Grawe, Sylvia I. Bohnenstengel, Ingo Schlüter, and Ralf Koppmann. "Joint modelling of obstacle induced and mesoscale changes-Current limits and challenges." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011.

Schroeder, Guido, and K. Heinke Schlünzen. "Numerical dispersion of gravity waves." *Monthly Weather Review*, 137, 2009: pp. 4344-4354.

Shin, H. H., and S.-Y. Hong. "Intercomparison of Planetary Boundary-Layer Parametrizations in the WRF Model for a Single Day from CASES-99." *Boundary-Layer Meteorology*, 2011: pp. 261-281.

Skamarock, William C., et al. "A Description of the Advanced Research WRF Version 3." *NCAR Technical Note / TN-457+STR*. Colorado, USA: National Center for Atmospheric Research, June 2008.

Stathopoulos, T. "The numerical wind tunnel for industrial aerodynamics: real or virtual for the new millennium?" *Wind and Structures*, 5, 2002: 193.

Stauffer, David R., Nelson L. Seaman, and Francis S. Binkowski. "Use of Four-Dimensional Data Assimilation in a Limited-Area Mesoscale Model Part II: Effects of Data Assimilation within the Planetary Boundary Layer." *Monthly Weather Review*, 119, 1991: pp. 734-754.

Stull, Richard B. *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Springer, 2009.

Sukoriansky, S., B. Galperin, and V. Perov. "A quasi-normal scale elimination model of turbulence and its application to stably stratified flows." *Nonlinear Processes in Geophysics*, 13, 2006: pp. 9-22.

Tamura, Y., et al. "Profiles of mean wind speeds and vertical turbulence intensities measured at seashore and two inland sites using Doppler sodars." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95, 2007: pp. 411-427.

Tamura, Yukio, et al. "Wind speed profiles measured over ground using Doppler sodars." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 83, 1999: pp. 83-93.

Tewari, Mukul, et al. "Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion." *Atmospheric Research*, 96, 2010: pp. 656-664.

Thunis, R., et al. "MESOCOM: An inter-comparison exercise of mesoscale flow models applied to an ideal case simulation." *Atmospheric Environment*, 37, 2003: pp.363-382.

Tsegas, G., Ph. Barmpas, I. Douros, and N. Moussiopoulos. "Implementation of efficient two-way mesoscale-microscale coupling using interpolating metamodels." *Proceedings of the 30th NATO/SPS International Technical Meeting on Air Polluting Modelling and its Application (ITM 09)*. San Francisco, USA: CD-ROM edition, 2009.

University Corporation for Atmospheric Research. *Weather Forecast Accuracy Gets Boost with New Computer Model*. 2006. <http://www.ucar.edu/news/releases/2006/wrf.shtml>.

University of Washington. *4/3-km Simulations of WRF version 3.1 and 3.1.1*. 2012. [http://www.atmos.washington.edu/~ovens/wrf\\_1.33km\\_striations/](http://www.atmos.washington.edu/~ovens/wrf_1.33km_striations/).

Van Nunen, J. W. G., and A. J. Persoon. "Investigation of the vibrational behaviour of a cable-stayed bridge under windloads." *Engineering Structures*, 4, 1982: pp. 99-105.

Versteeg, H. K., and W. Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Harlow, England: Pearson Education, 2007.

Vogt, S., and P. Thomas. "A useful remote sounder to measure wind and turbulence." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 54-55, 1995: pp. 163-172.

Weitkamp, Claus. *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. New York, USA: Springer, 2005.



- Welch, Greg, and Gary Bishop. *An Introduction to the Kalman Filter*. University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, TR 95-041, 2002.
- Wieringa, Jon. "Updating the davenport roughness classification." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41, 1992: pp. 357-368.
- Wolar, John. "Meteorological towers and wind power analysis." 2008.
- Xie, Z., P. R. Voke, P. Hayden, and A. G. Robins. "Large-eddy simulation of turbulent flow over a rough surface." *Boundary Layer Meteorology*, 111, 2004: pp. 417-440.
- Yamada, T. "Merging CFD and atmospheric modeling capabilities to simulate airflows and dispersion in urban areas." *Computational Fluid Dynamics* 13, 2004: pp. 329-341.
- Yamada, T., and K. Koike. "The A2C mesoscale meteorological modeling system." *CWE2010*. Chapel Hill, NC, 2010.
- Yamada, Tetsuji, and Katsuyuki Koike. "Downscaling mesoscale meteorological models for computational wind engineering applications." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011.
- Yang, W., X. Jin, H. Jin, M. Gu, and S. Chen. "Application of new inflow boundary conditions for modeling equilibrium atmosphere boundary layer in rans-based turbulence models." *Proceedings of International Conference on Wind Engineering 2007*. 2007.
- Yang, Yi, Ming Gu, Suqin Chen, and Xinyang Jin. "New inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97, 2009: pp. 88-95.
- Zajackowski, Frank J., Sue Hellen Haupt, and Kerrie J. Schmehl. "A preliminary study of assimilating numerical weather prediction data into computational fluid dynamics models for wind prediction." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99, 2011: pp. 320-329.
- Zdunkowski, Wilford, and Andreas Bott. *Dynamics of the Atmosphere: A course in theoretical meteorology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- Zhang, C. X. "Numerical predictions of turbulent recirculating flows with a k-epsilon model." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97, 1994: pp. 177-201.
- Zhang, Xin, Yong-Run Guo, Syed R-H Rizvi, Hans Huang, and Michael Duda. "WRF-Var System Overview." 2010.



## APÉNDICE A. ALGUNOS ELEMENTOS DEL FILTRO DE KALMAN EXTENDIDO

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \beta_{B1} \\ \delta_{B1} \\ \beta_{B2} \\ \delta_{B2} \end{bmatrix} \quad (79)$$

$$z_m = h(x) + \varepsilon = \begin{bmatrix} \operatorname{arctg}\left(\frac{y - y_{01}}{x - x_{01}}\right) \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{z - z_{01}}{\sqrt{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2}}\right) \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{y - y_{02}}{x - x_{02}}\right) \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{z - z_{0i}}{\sqrt{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2}}\right) \end{bmatrix} + \varepsilon \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (80)$$

$$H = \begin{bmatrix} -\frac{y - y_{01}}{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2} & \frac{x - x_{01}}{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{(x - x_{01})(z - z_{01})}{\left[\frac{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2}{\sqrt{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2}}\right] \sqrt{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2}} & -\frac{(y - y_{01})(z - z_{01})}{\left[\frac{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2}{\sqrt{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2}}\right] \sqrt{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2}} & \frac{\sqrt{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2}}{\left[\frac{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2}{\sqrt{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2}}\right] \sqrt{(x - x_{01})^2 + (y - y_{01})^2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{y - y_{02}}{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2} & \frac{x - x_{02}}{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{(x - x_{02})(z - z_{02})}{\left[\frac{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2}{\sqrt{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2}}\right] \sqrt{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2}} & -\frac{(y - y_{02})(z - z_{02})}{\left[\frac{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2}{\sqrt{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2}}\right] \sqrt{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2}} & \frac{\sqrt{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2}}{\left[\frac{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2}{\sqrt{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2}}\right] \sqrt{(x - x_{02})^2 + (y - y_{02})^2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (81)$$



## APÉNDICE B. CONSIDERACIONES PARA EL CORRECTO USO DE LAS FUNCIONES DE PARED EN SIMULACIONES CFD

El procedimiento para determinar el valor de las variables en las celdas más próximas a una pared viene determinado fundamentalmente por el hecho de que dichas celdas se encuentren en la zona laminar o turbulenta de la capa límite.

Para analizar el flujo en las inmediaciones de la pared se recurre a un número de Reynolds basado en la distancia  $y$  hasta la pared. Cuando el valor de  $y$  es elevado las fuerzas de inercia predominan sobre las viscosas, de igual modo que sucede en la corriente libre, ahora bien, a medida que el valor de  $y$  disminuye, aproximándose a la pared, el número de Reynolds también lo hace, hasta llegar a alcanzar valores del orden de 1, donde las fuerzas viscosas son del mismo orden que las de inercia o incluso mayores. De esta forma, se considera que la capa límite está formada por dos zonas: Una zona externa y de mayor tamaño en la cual el flujo es turbulento y las fuerzas de inercia dominan sobre las viscosas; una zona interna, conocida como subcapa límite laminar en la cual las fuerzas viscosas son las dominantes (Versteeg and Malalasekera 2007). Cerca de la pared, el flujo es influenciado por los esfuerzos viscosos llegando a depender la velocidad local  $U$  únicamente de la distancia a la pared  $y$ , la densidad del fluido  $\rho$ , la viscosidad  $\mu$  y la tensión viscosa en la pared  $\tau_w$ . El análisis dimensional muestra que

$$u^+ = \frac{U}{u_*} = f\left(\frac{\rho u_* y}{\mu}\right) = f(y^+) \quad (82)$$

Donde  $u_\tau$  es la velocidad de fricción definida como  $u_* = (\tau_w/\rho)^{1/2}$ . Esta expresión, conocida como **ley de la pared**, relaciona dos importantes magnitudes adimensionales: la velocidad adimensional  $u^+$  y la distancia a la pared (adimensional también)  $y^+$ , definida a su vez como  $y^+ = \frac{u_* y \rho}{\mu}$ .

### ***Sub capa límite laminar o viscosa - capa en contacto con la pared***

En las inmediaciones de la pared la turbulencia desaparece y el flujo está dominado únicamente por los efectos viscosos. Esta zona es extremadamente fina ( $y^+ < 5$ ) y en ella se puede considerar que las tensiones viscosas son constantes e iguales a  $\tau_w$ :

$$\tau(y) = \mu \frac{\partial U}{\partial y} \cong \tau_w \quad (83)$$

Integrando respecto a  $y$  y aplicando la conocida condición de contorno para la velocidad de  $U = 0$  en  $y = 0$ , se obtiene la siguiente relación lineal entre la velocidad local y la distancia a la pared:

$$U = \frac{\tau_w y}{\mu} \quad (84)$$

Mediante relaciones algebraicas simples y empleando la definición de  $u^+$  y  $y^+$  se concluye que

$$u^+ = y^+ \quad (85)$$

**Capa límite logarítmica - región turbulenta cercana a la pared**

Fuera de la subcapa límite viscosa se encuentra una región ( $30 < y^+ < 500$ ) en la que tanto los efectos viscosos como los turbulentos son importantes. Las tensiones viscosas varían lentamente con la distancia a la pared y es posible obtener una relación funcional entre  $u^+$  y  $y^+$ :

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (86)$$

El valor de las constantes puede ser calculado a partir de mediciones empíricas, de tal forma que el valor de la constante de Von Karman es 0.4 y el valor de la E 9.8 en el caso de paredes lisas, en paredes rugosas el valor de la E disminuye. Esta expresión es conocida como la **ley logarítmica**.

En la Figure 59 aparece una representación gráfica de las leyes lineal y logarítmica en la que puede comprobarse la bondad de su ajuste con las mediciones experimentales.

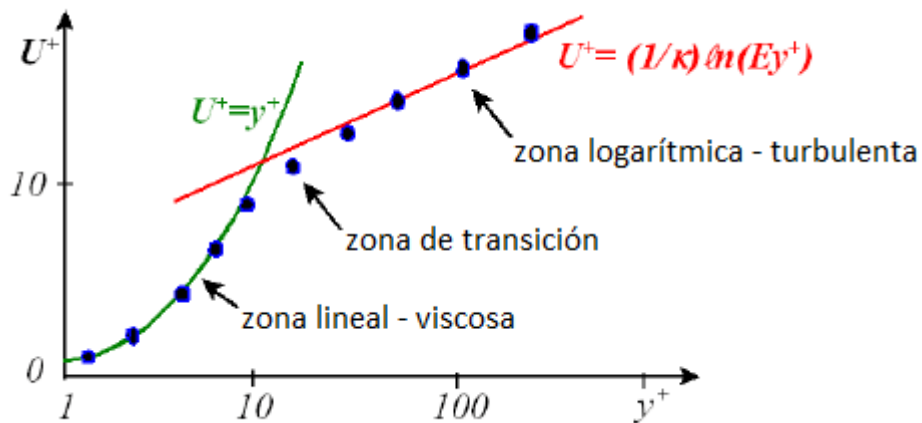


FIGURE 59: DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN LAS PROXIMIDADES DE UNA PARED SÓLIDA. ADAPTADO DE (PEDRUELO TAPIA 2009)

En los modelos de turbulencia RANS de los códigos CFD existen dos posibles formas de abordar la resolución de la capa límite:

- Resolver la capa límite: modelos llamados de “*Reynolds bajo*”

- Recurrir al empleo de las funciones de pared: modelos llamados de “Reynolds alto”

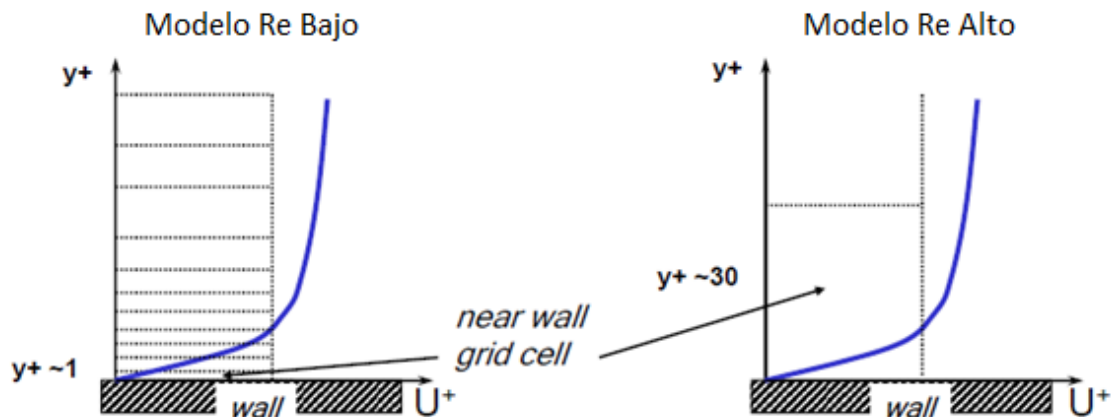


FIGURE 60: TAMAÑOS DE CELDA PARA MODELOS DE REYNOLDS ALTO Y BAJO. ADAPTADO DE (KUREKOV NOVIEMBRE 2009)

Como se aprecia en la imagen, la resolución mediante uno u otro método  $y$ , por tanto, la elección de unas condiciones de contorno adecuadas, viene determinada por el tamaño de las celda más próxima a la pared, evaluando dicha distancia mediante el  $y^+$ :

$$y^+ = \frac{\Delta y_p}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (87)$$

Donde  $\Delta y_p$  es la altura de la celda adyacente a la pared. En caso de que el  $y^+ \leq 11.63$  el flujo en la primera celda se considera que constituye la subcapa límite laminar-viscosa. Por el contrario, en caso de que el  $y^+ \geq 11.63$ , se considera que el flujo en dicha celda es turbulento y resulta de aplicación la ley logarítmica (86). El valor de 11.63, en el cual cambia la naturaleza del flujo, se determina por la intersección entre la expresión lineal de la zona viscosa y la logarítmica de la zona turbulenta.

Recurriendo nuevamente a la Figure 60, es fácil intuir que el número de elementos de malla requeridos para resolver detalladamente la capa límite y emplear por tanto un modelo de “*Reynolds bajo*” puede ser prohibitivo en la mayor parte de las ocasiones, es por ello que lo habitual es emplear modelos de “*Reynolds alto*” en los que el efecto de la pared sólida en el flujo de la celda más próxima a dicha pared se representa mediante el empleo de las **funciones de pared**.

Los **modelos de “*Reynolds alto*”**, como el modelo  $k-\varepsilon$  estándar, evitan la necesidad de integrar las ecuaciones del modelo hasta la misma pared aprovechando el comportamiento universal de los flujos próximos a ella. Así, el valor de la velocidad para un nodo de la malla situado a una distancia de la pared cuyo valor  $y^+$  está comprendido entre 30 y 500 ha de satisfacer la ley logarítmica anteriormente expuesta. Además, las pruebas realizadas indican que el nivel de producción de energía cinética de la turbulencia es igual al de disipación. Con todo esto es posible establecer las funciones de pared para el

modelo  $k-\varepsilon$  estándar que permiten determinar el valor de las variables en las celdas adyacentes a la pared:

$$\begin{aligned} u^+ &= \frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \\ k &= \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \\ \varepsilon &= \frac{u_*^3}{\kappa y} \end{aligned} \tag{88}$$

Los modelos más habituales de “*Reynolds alto*” son el  $k-\varepsilon$  (en sus diferentes variantes), el  $k-\omega$  y el  $k-\omega$  *sst*.

Por el contrario, en los **modelos de “*Reynolds bajo*”**, la ley logarítmica no es válida y por ello no pueden emplearse las funciones de pared anteriormente comentadas. Deben realizarse modificaciones en las ecuaciones del modelo  $k-\varepsilon$  estándar de tal forma que sean válidas para lidiar con flujos con un número de Reynolds bajo. Algunos de los modelos  $k-\varepsilon$  más habituales para Re bajo son los propuestos por (Lam y Bremhorst 1981) y (Launder y Sharma 1974), teniendo todos ellos en común la mayor dificultad de conseguir la convergencia de la  $\varepsilon$  en las inmediaciones de la pared.

Para conseguir la máxima **precisión** con cada uno de los modelos es muy recomendable elaborar una malla en la cual el valor del  $y^+$  sea cercano a 1 si se va a emplear un modelo de Re bajo, o bien cercano a 40 en caso de que el modelo empleado sea de Re alto y, por tanto, se empleen funciones de pared.

En el caso de trabajar con **superficies sólidas rugosas**, es decir, aquellas en las cuales los obstáculos presentes en la superficie no aparecen modelados explícitamente por su pequeño tamaño, el valor del  $y^+$  en el que se produce el cambio de régimen laminar a turbulento varía. Como se menciona anteriormente dicho valor era 11.63, determinado por la intersección entre la ley lineal y la logarítmica, ahora bien, como consecuencia de la rugosidad de la pared la ley logarítmica se ve modificada. Dicho fenómeno fue ampliamente estudiado por (Nikuradse 1933), quien determinó que el perfil de velocidades en la zona turbulenta sigue obedeciendo a una ley logarítmica de la misma pendiente pero diferente punto de intersección, como consecuencia de la variación que se produce en el valor de la constante de la ley logarítmica al introducir la rugosidad y siendo definida dicha rugosidad en función del tamaño de grano de arena (en inglés *sand-grain roughness*  $k_s$ ). La expresión corregida de la ley logarítmica en función de la rugosidad se recoge en (Cebeci y Bradshaw 1977):



$$u^+ = \frac{1}{K} \ln(y^+) + B - \Delta B(k_s^+) \quad (89)$$

Donde la corrección es función de la rugosidad adimensional  $k_s^+ = u_\tau k_s / \nu$ . En función del valor de la rugosidad adimensional pueden establecerse tres regímenes distintos, cada uno de los cuales incluye sus propias ecuaciones para calcular el valor del  $\Delta B$ :

- $k_s^+ < 2.25$ , la rugosidad no tiene un efecto aerodinámico, el valor del  $\Delta B$  es 0.
- $2.25 \leq k_s^+ < 90$ , zona de transición.
- $k_s^+ \geq 90$ , zona completamente turbulenta.

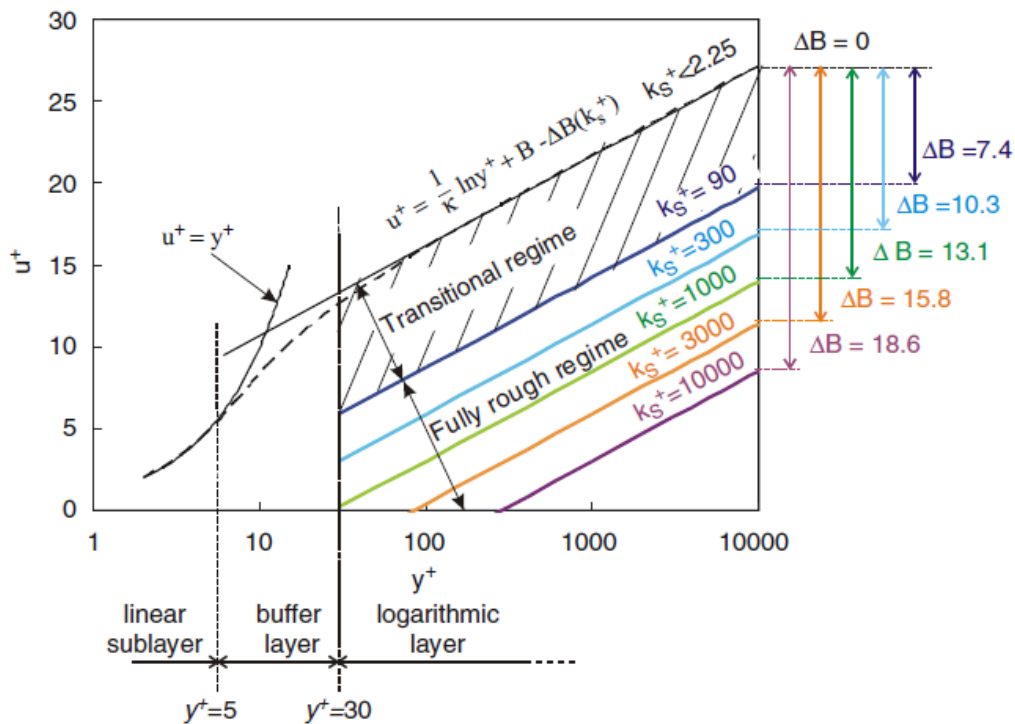


FIGURE 61: VARIACIÓN DE LA LEY LOGARÍTMICA PARA DIFERENTES VALORES DE RUGOSIDAD (BLOCKEN, STATHOPOULOS AND CARMELIET 2007)

Se debe tener en cuenta que el valor de la rugosidad afecta también a las funciones de la pared para la  $k$  y la  $\epsilon$  mediante la velocidad de fricción.

**En OpenFOAM** la rugosidad se puede modelar mediante la función de pared para la viscosidad *nutkRoughWallFunction*. En ella se deben definir dos parámetros: la altura de rugosidad de grano de arena  $k_s$  y la constante de rugosidad  $C_s$ . Dicha constante permite tener en cuenta el tipo de rugosidad, siendo 0.5 el valor que adopta cuando se emplea la rugosidad basada en la altura del grano de arena.