



Revista Cubana de Meteorología

ISSN: 0864-151X

ISSN: 2664-0880

Instituto de Meteorología

Álvarez-Suau, Celia Margarita; Gallardo-Avilés, Yordan
Ondas de montaña en zonas de la Sierra de la Gran Piedra, Cuba
Revista Cubana de Meteorología, vol. 25, núm. 1, e02, 2019
Instituto de Meteorología

DOI: <https://doi.org/opn.to/a/5A4zC>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=701977488002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UDEM
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Ondas de montaña en zonas de la Sierra de la Gran Piedra, Cuba

Mountain waves in zones of the Sierra de la Gran Piedra, Cuba



<http://opn.to/a/5A4zC>

Celia Margarita Álvarez-Suau ^{1*}, Yordan Gallardo-Avilés ¹

¹Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, Camagüey, Cuba.

RESUMEN: Se presenta un estudio preliminar de ondas de gravedad internas (montaña) enfocado en la Sierra de la Gran Piedra, específicamente en loma de La Africana, donde se realizó un diagnóstico del campo de viento en orografía compleja con sondeos interpolados de la atmósfera y datos de los Archivos del Laboratorio de Recursos del Aire (ARL, siglas en inglés). Estos sondeos se analizaron con el Sistema Integral para el Análisis de Sondeos Aerológicos (SIASA). Conocer la presencia de este fenómeno meteorológico resulta de gran utilidad para el desarrollo de actividades de gran interés socioeconómico en zonas montañosas, como son el turismo, los deportes de montaña, el tráfico aéreo y la siembra de nubes orográficas. Por lo cual se investigaron las condiciones necesarias para la formación de las ondas y sus efectos, entre ellos, la turbulencia atmosférica, tercera causa de accidentes aéreos de origen meteorológico y la influencia que ejerce este fenómeno meteorológico sobre la distribución de las precipitaciones. La presencia de ondas de montaña en la región de estudio se detectó mediante un modelo numérico de alta resolución, que incluye los efectos provocados por la complejidad del terreno, el número de Froude y el Duct Factor, indicadores muy usados internacionalmente. Los resultados evidenciaron actividad ondulatoria a través de las simulaciones numéricas y el SIASA con el número de Froude alrededor de uno y valores positivos del Duct Factor favorable para propagación de ondas.

Palabras clave: ondas de montaña, número de Froude, SIASA, Duct Factor, siembra de nubes orográfica.

ABSTRACT: A preliminary study of internal gravity waves (mountain) focused on the Sierra Gran Piedra, specifically on the hill of La Africana, where a diagnosis of the wind field was made in complex orography interpolated consonants of the atmosphere and data from the Archives of the Laboratory of Air Resources (ARL, acronym in English). These surveys were analyzed with the Integral System for the Analysis of Aerological Surveys (SIASA). Knowing the presence of this meteorological phenomenon is very useful for the development of activities of great socioeconomic interest in mountainous areas, such as tourism, sports, air traffic and planting seeding of orographic clouds. Therefore, the necessary conditions for the formation of the waves and their effects were investigated, among them, the atmospheric turbulence, third cause of meteorological accidents and the influence exerted by this meteorological phenomenon in the distribution of the precipitations. The presence of mountain waves in the study region was detected by means of a high resolution numerical model, which includes the effects caused by the complexity of the terrain, the Froude number and the Duct Factor, internationally used indicators. The results showed wave activity through the numerical simulations and the SIASA with the number of Froude around one and positive values of the Duct Factor favorable for wave propagation.

Keywords: mountain waves, Froude number, SIASA, Duct Factor, seeding of orographic clouds.

*Autor para correspondencia: Celia Margarita Álvarez-Suau, E-mail: celia.suau@cmw.insmet.cu

Recibido: 11/06/2018

Aceptado: 17/01/2019

INTRODUCCIÓN

Las ondas de gravedad internas (montaña), son el resultado de la incidencia del flujo de aire sobre una barrera topográfica, que adoptan un comportamiento ondulatorio a sotavento del obstáculo ([Lozano, 2013](#)). Por su capacidad de transportar energía y cantidad de movimiento juegan un papel fundamental en la circulación general de la atmósfera, [Nappo, 2002](#). Estas ondas se desarrollan dentro de la escala de los procesos atmosféricos en una región específica de la mesoescala conocida como escala meso-gamma definida por [Orlanski, 1975](#).

Este fenómeno ondulatorio se produce cuando una parcela de aire es desplazada desde su posición inicial, debido a un obstáculo mecánico, una fuerza de restauración (fuerza de flotación) hace que vuelva a su posición inicial. A continuación, esta parcela debido a la inercia, generalmente, tiende a sobrepasar su nivel de equilibrio inicial y se mueve en dirección opuesta al desplazamiento inicial impuesto, creándose una oscilación alrededor de la posición de equilibrio, hasta que consiga finalmente volver a su posición de equilibrio o reposo.

Existen dos condiciones necesarias para la formación de las ondas que se limitan a: (1) la existencia de estabilidad estática a sotavento, que favorezca la oscilación de la parcela respecto a su nivel de equilibrio; y (2) la presencia de vientos perpendiculares a la montaña, que aporten la energía cinética suficiente para que la parcela de aire pueda superar la barrera montañosa.

Respecto a la estabilidad estática, es la que evalúa la resistencia gravitacional de la atmósfera a los desplazamientos verticales, lo que resulta fundamentalmente de ajustes de flotabilidad, y por tanto está determinada por la estratificación de la densidad o de la temperatura potencial, θ .

Algunos investigadores han estudiado los efectos que producen estas ondas ya que inician y organizan la convección, [Zhang et al., 2001](#), generan y modulan turbulencia atmosférica, [Doyle y Durran, 2002](#) y modifican la distribución de las precipitaciones, [Gaffin et al., 2003](#), [Roe, 2005](#). Para la observación de estos efectos los instrumentos empleados son muy diversos, pero muy costosos. Por tal motivo, se ha fomentado su estudio empleando simulaciones numéricas de

alta resolución. Autores como [Shutts, 1992](#), [Clark et al. 1994](#), [Doyle et al., 2002](#); [Smith, 2004](#), [Garvert et al., 2007](#) y [Posada, 2012](#) han demostrado la capacidad de estos modelos para simular la estructura real de las ondas.

Un penacho nuboso indica la probable actividad de ondas a sotavento, que pueden observarse en las imágenes de los satélites meteorológico como un quiebre abrupto en la nubosidad que se alinea con la cadena montañosa en el canal visible, mientras que, se aprecian como perturbaciones en el contenido total de vapor en los niveles medios y altos de la atmósfera, evidenciando la presencia de ondas y la turbulencia asociada. No obstante, la ausencia de nubosidad no implica su existencia y puede coexistir turbulencia de aire claro.

Por otra parte, la siembra de nubes es una técnica muy común para modificar las precipitaciones; que puede realizarse a través de dos modalidades: siembra aérea y terrestre. La segunda consiste en la instalación de una red de generadores de aerosoles de yoduro de plata, que se instala a una determinada altura en la zona de barlovento de una cordillera montañosa para aprovechar el aire que asciende y en situaciones en las cuales se presentan las ondas de montaña la red se sitúa en los valles entre dos cordilleras, con el fin de utilizar este fenómeno meteorológico como un mecanismo de elevación del reactivo.

Estas ondas pueden transportar energía y cantidad de movimiento [Lindzen, 1990](#), lo que en ciertas condiciones puede producir turbulencia [Lilly, 1978](#), siendo la tercera causa de accidentes aéreos de origen meteorológico [Moreno & Gil, 2003](#), representando un grave peligro para la aviación, [Linés, 1982](#). Los aeropuertos próximos a cordilleras montañosas son susceptibles de sufrir estos efectos, por lo que es de gran utilidad detectar actividad ondulatoria en esas zonas. En Cuba está el caso del Aeropuerto de Santiago de Cuba, el cual se encuentra ubicado cerca de la Sierra de La Gran Piedra.

Las montañas están muy ligadas a la práctica de deportes usando las características climáticas y físicas que ofrecen las mismas, siendo el parapente y el ciclismo de montaña los más comunes, con eventos competitivos nacionales e internacionales. Cabe destacar que los

ecosistemas de montaña de Cuba no escapan al dinámico crecimiento del sector turístico, y ya muchas de las ofertas incluyen programas de senderismo, montañismo, el cicloturismo, entre otras opciones. El potencial de esa actividad está en el relieve cubano, pues la nación cuenta con cuatro macizos montañosos que ocupan aproximadamente el 21 por ciento de la superficie total de la isla.

Con el objetivo de buscar evidencias de ondas de montañas en loma de La Africana, se emplea un modelo numérico de alta resolución para su detección, que incluye algunos parámetros reveladores de la formación y propagación de ondas. Así como un previo estudio de factibilidad por la complejidad del terreno con sondeos interpolados de la atmósfera y la aplicación de un software para viabilizar el proceso de análisis.

MATERIALES Y MÉTODOS

La naturaleza del trabajo que se ha llevado a cabo hace que la elección del lugar de experimentación haya sido una cadena montañosa con suficiente longitud. Se eligió la loma de La Africana como lugar idóneo para la experimentación, tanto por las razones antes expuestas como por su proximidad geográfica a la ciudad de Santiago de Cuba. Para ello se realizó un diagnóstico del campo de viento en orografía compleja en los primeros mil metros del suelo.

Con el fin de cubrir la Región de estudio se seleccionaron las coordenadas y las alturas a través de sitio web <http://www.altitude.nu/>, (Tabla 1), sitio interactivo para obtener mapas con datos de elevación y topográficos.

Estudiar el comportamiento de la atmósfera a ambos lados de un obstáculo montañoso es necesario para determinar el lugar en que se encuentra situado la zona de barlovento, sotavento y los fenómenos relacionados a través de sondeos reales de la atmósfera, sin embargo, por su elevado costo, son escasas las estaciones aerológicas en Cuba. Como alternativa en este

estudio se utilizaron sondeos interpolados con datos de los archivos del Laboratorio de Recursos del Aire (ARL, siglas en inglés) de las 15, 18, 21 horas GMT, del año 2010, derivados de los modelos numéricos de predicción a través del Modelo de Asimilación de Datos Globales (GDAS, siglas en inglés).

La descarga de datos utilizando este modelo, resultó de útil aplicación, ya que el modelo GDAS posee un archivo meteorológico con datos almacenados desde el 1 de diciembre de 2004, disponibles en el sitio web de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, siglas en inglés), localizable en la siguiente dirección: <http://www.arl.noaa.gov/READYamet.php>. Este procedimiento es rápido, práctico y sencillo, puede ser aplicado a cualquier localidad de la que se conozcan sus coordenadas geográficas. Además, proporciona una amplia gama de datos (altura geopotencial, temperatura, punto de rocío, velocidad y dirección del viento a diferentes niveles de presión) y resultados (índices de estabilidad atmosférica ya calculados). Una vez que se determinaron las zonas de barlovento y sotavento se tuvo en cuenta las condiciones de formación de las ondas.

Se empleó el software SIASA para realizar y analizar los perfiles verticales de la atmósfera de forma gráfica y calculada, desarrollado en el lenguaje de programación Python versión 3.0, a través del código TEMP (FM-35), para codificar los datos de la TAE 3 a un formato de telegrama de sondeos aerológicos y se utilizó el gráfico SkewT. Asimismo, se implementó el cálculo de un parámetro para el estudio de situaciones con ondas de montaña, incorporado a los indicadores de las condiciones de estabilidad estática y dinámica, que permitieron evaluar las condiciones ambientales que favorecieron las ondas y el desarrollo de la convección en el área de estudio.

El número de Froude, es un parámetro adimensional de escala meso- γ , utilizado para conocer la capacidad de bloqueo de la barrera

Tabla 1. Coordenadas geográfica del área de estudio, donde se obtuvieron los datos

Lugar	Latitud (grados N)	Longitud (grados W)	Altura (m)
Barlovento	20.0165809604314	-75.5419921875	210.76
Loma La Africana	20.0036770766776	-75.59417724609375	1072.28
Sotavento	19.97851146065698	-75.64979553222656	159.92

montañosa respecto a un flujo de aire incidente, [Koletsis et al., 2009](#), se calculó la velocidad del flujo y la estabilidad atmosférica a barlovento y altura del obstáculo con la siguiente ecuación:

$$Fr = \frac{U}{NH_{max}} \quad (1)$$

La variable U corresponde a la velocidad del viento perpendicular a la barrera topográfica que obstruye el flujo y N es la frecuencia de Brünt-Väisälä que representa la estabilidad estática del aire.

La Explicación teórica establece que si $Fr < 1$ el flujo quedaría bloqueado o bordearía la barrera; si $Fr \geq 1$, entonces habría probabilidad de actividad ondulatoria, y si $Fr \gg 1$ el flujo superaría la barrera sin oscilaciones significativas. Sin embargo, varios estudios ([Smolarkiewicz y Rotunno \(1989\)](#), [Smith \(2004\)](#)) han demostrado que, para obstáculos tridimensionales, el flujo es capaz de superar la barrera si $Fr > 0,5$.

La frecuencia de las oscilaciones de las ondas internas se denomina frecuencia de

Brünt-Väisälä (N), es la máxima frecuencia de oscilación vertical de propagación de las ondas de gravedad internas y expresa la estabilidad de una parcela de fluido atmosférico cuando es forzado por el viento a moverse por encima de los accidentes orográficos. Para las oscilaciones verticales reales (z) de la parcela del fluido, N

viene expresada en términos de la temperatura potencial, [Nappo, 2002](#). La ocurrencia de la onda solo es posible cuando la atmosfera es establemente estratificada, si $\partial\theta/\partial Z > 0$.

$$N = \sqrt{\frac{g}{\theta} \frac{\partial\theta}{\partial Z}} \quad (2)$$

Donde g es la aceleración de gravedad local y θ la temperatura potencial.

El SIASA por su parte utilizó una librería de SkewT, que contiene un paquete donde se implementaron las ecuaciones de la termodinámica y constantes universales para dichos cálculos a partir de las variables de los sondeos interpolados de un punto determinado. Al mismo tiempo, los datos de salida se imprimieron en un archivo Excel ([Figura 1](#)), mostrando los indicadores para el estudio de las ondas de montaña y los que determinan la estabilidad estática y dinámica de la atmosfera en la zona escogida, [Gallardo et al., 2017](#).

De las estratificaciones efectuadas se seleccionó la altura de la montaña y los valores de Fr entre 0.5 y 3 por niveles de altura. Con este análisis se establecieron las dos poblaciones que se utilizaron en este estudio denominadas días con ondas y días sin ondas (DCO y DSO), se analizaron para el caso de los Fr adecuados en el menos un horario denominado (DCO1h y DSO1h) y el otro caso para todos los horarios (DCOth y DSOth). Para determinar si estas

Columna1	Columna2	Columna3	Columna4	Columna5	Columna6	Columna7	Columna8	Columna9	Columna10	Columna11	Columna12	Columna13
Fecha	Altura	Presión	FBV	∂θ/∂Z	Fr	15z	18z	21z	15z	18z	21z	
1	10	900	0.017	0.01	0.19	0.32	0.58	1937 J/kg	2289 J/kg	1891 J/kg		
2	10	900	0.018	0.01	0.3	0.28	0.25	1872 J/kg	2740 J/kg	2458 J/kg		
3	10	900	0.017	0.01	0.29	0.29	0.3	2015 J/kg	2986 J/kg	2627 J/kg		
4	10	900	0.018	0.01	0.1	0.06	0.15	1981 J/kg	3274 J/kg	3250 J/kg		
5	10	900	0.017	0.01	0.2	0.1	0.13	2391 J/kg	3876 J/kg	2929 J/kg		
6	10	900	0.017	0.01	0.12	0.11	0.27	2771 J/kg	4201 J/kg	3067 J/kg		
7	10	900	0.019	0.01	0.45	0.67	0.7	1546 J/kg	3701 J/kg	2372 J/kg		
8	10	900	0.017	0.01	0.14	0.04	0.4	1925 J/kg	3093 J/kg	2190 J/kg		
9	10	900	0.017	0.01	0.57	0.24	0.15	1777 J/kg	2974 J/kg	1836 J/kg		
10	10	900	0.017	0.01	0.5	0.54	0.39	1312 J/kg	1671 J/kg	1603 J/kg		
11	10	900	0.018	0.01	0.31	0.06	0.17	2245 J/kg	3605 J/kg	2889 J/kg		
12	10	900	0.018	0.01	0.54	0.63	0.54	2503 J/kg	3264 J/kg	3324 J/kg		
13	10	900	0.017	0.01	0.55	0.2	0.1	2513 J/kg	3183 J/kg	3044 J/kg		
14	10	900	0.019	0.01	0.44	0.36	0.22	926 J/kg	3158 J/kg	2943 J/kg		
15	10	900	0.018	0.01	0.26	0.3	0.3	1109 J/kg	1969 J/kg	1638 J/kg		
16	10	900	0.017	0.01	0.41	0.27	0.22	2402 J/kg	2946 J/kg	2507 J/kg		
17	10	900	0.017	0.01	0.58	0.02	0.02	2235 J/kg	3092 J/kg	3157 J/kg		
18	10	900	0.017	0.01	0.23	0.09	0.03	2034 J/kg	2948 J/kg	2693 J/kg		
19	10	900	0.017	0.01	0.28	0.14	0.01	1691 J/kg	2131 J/kg	1904 J/kg		
20	10	900	0.017	0.01	0.36	0.15	0.04	1629 J/kg	1637 J/kg	1423 J/kg		
21	10	900	0.016	0.01	0.25	0.25	0.07	1386 J/kg	2078 J/kg	2149 J/kg		
22	10	900	0.017	0.01	0.66	0.42	0.25	1917 J/kg	2242 J/kg	2237 J/kg		
23	10	900	0.018	0.01	0.43	0.4	0.39	2258 J/kg	3012 J/kg	2714 J/kg		
24	10	900	0.019	0.01	0.72	0.68	0.57	2204 J/kg	3027 J/kg	2617 J/kg		
25	10	900	0.019	0.01	0.71	0.54	0.43	1820 J/kg	2525 J/kg	2139 J/kg		
26	10	900	0.019	0.01	0.51	0.32	0.39	1591 J/kg	2005 J/kg	2180 J/kg		
27	10	900	0.018	0.01	0.46	0.61	0.86	1930 J/kg	2579 J/kg	2432 J/kg		
28	10	900	0.017	0.01	0.55	0.77	0.86	1328 J/kg	1978 J/kg	1462 J/kg		
29	10	900	0.017	0.01	0.53	0.34	0.42	1714 J/kg	1885 J/kg	1626 J/kg		
30	10	900	0.018	0.01	0.58	0.63	0.67	1590 J/kg	3008 J/kg	1936 J/kg		
31	10	900	0.018	0.01	0.59	0.6	0.55	1618 J/kg	2103 J/kg	1896 J/kg		

Figura 1. Archivo Excel con datos de presión, altura, N, Fr, el gradiente de la temperatura potencial y la CAPE del mes de octubre

diferencias han sido estadísticamente significativas, se ha realizado el Test de Mann-Whitney, muy utilizado en análisis meteorológicos, se ha realizado comparando Fr de días con ondas y sin ondas de montaña entre las 1500 y 2100 UTC.

Para la detección de las ondas de montaña se utilizó un modelo numérico 3D, con ajuste dinámico en los campos meteorológicos de interés para esta investigación, que incluye los efectos provocados por la complejidad del terreno, además del número de Froude. El modelo está basado en los pronósticos numéricos inmediato en el dominio de un kilómetro de resolución espacial, el cual se extiende entre los 19.0 - 21.0 N y los 74 -76.0 W que cubre el área de estudio. Las ecuaciones del movimiento vertical se consideraron en equilibrio hidrostático, limitante para el caso de altas resoluciones espaciales, pero se resolvió con la estrategia de integración numérica que se diseñó, (Morfa 2016).

De forma complementaria se incluyó en el modelo el Duct Factor (DF), herramienta creada por Koch y O'Handley 1997 para determinar el área óptima para la propagación de ondas de montaña. Este factor se basa en la teoría lineal de Lindzen y Tung 1976, que establece, una propagación es eficiente cuando existe una capa condicionalmente inestable sobre otra estáticamente estable, la cual actúa como capa de propagación. En general, áreas positivas de DF representan regiones favorables para la propagación, y cuanto mayor sean los valores, más favorable es el ambiente. Koch y Saleeby, 2001 sugieren que un DF de entre 10 y 15 es suficiente para considerar el ambiente altamente favorable para la propagación, mientras que Gaffin, 1999 demostró que las ondas pueden formarse en ambientes con valores entre 5 y 10. Su análisis se realiza para el estudio de ondas de gravedad mesoescales, con independencia de su origen de formación, por lo que no es exclusivo para el estudio de ondas de montaña y se define como:

$$DF = [\theta(p_2) - \theta(p_1)] + [\theta_e(p_2) - \theta_e(p_3)](3)$$

Donde θ es la temperatura potencial y θ_e es la temperatura potencial equivalente a los niveles de presión $p_1 > p_2 > p_3$. De este modo, la capa

condicionalmente inestable queda definida por los niveles de presión p_2 - p_3 , y está situada por encima de la capa estáticamente estable con base en superficie, p_1 - p_2 . Su cálculo da una idea de la localización óptima para la formación y propagación de ondas, Gaffin *et al.*, 2003.

Se eligió dicho modelo, por ser más factible en términos de recursos computacionales, que la implementación de dominios fijos de mayor resolución a partir de modelos de más complejidad. Las simulaciones se imprimieron en mapas muy representativos del área de estudio con sus resultados y se compararon con los obtenidos con el SIASA.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

En este trabajo se estudiaron por vez primera las ondas de montaña en la región de la Gran Piedra, si bien se ha avanzado en la comprensión acerca de este fenómeno, aún no es suficiente para predecir con certeza su presencia y los efectos que puedan causar, ya que se cuenta con poca información de las salidas numéricas, así como de las imágenes de satélite meteorológico a través de la nubosidad que caracteriza su presencia.

Se realizó una valoración de los resultados del estudio de factibilidad práctica en la zona de trabajo, en el primer paso se analizaron las direcciones del viento para cada uno de los días en los que se realizaron los sondeos interpolados. Este análisis permitió clasificar los días correspondientes a direcciones en el viento consistentes a lo largo del periodo de análisis.

Aquellos días en los que no existió una dirección de viento definida, es decir, que no correspondió a un régimen general de vientos, sino que obedecía a fenómenos relacionados con las características topográficas locales no se tuvo en cuenta. En el primero de los casos, cuando existió una dirección definida y aproximadamente perpendicular al eje de la montaña, se delimitó que era el lugar situado a barlovento, con viento predominante de componente ENE, con un ángulo de inclinación de aproximadamente 30° con respecto al norte y lógicamente, el otro lugar sotavento.

A partir de los datos tomados por el del modelo GDA se pueden derivar el perfil vertical de la temperatura potencial θ y, por tanto, su

gradiente, de hecho, se calculó para cada caso de estudio, lo cual hizo posible analizar la evolución temporal de la estabilidad estática. De este análisis se puede concluir que los patrones de estabilidad de días DCO y DSO han sido muy semejantes, lo cual indica que la estabilidad estática es un factor necesario, pero no suficiente para que se formen ondas de montaña, por lo tanto, no es concluyente, ya que su formación está determinada, no solo por la estabilidad, sino también por la velocidad y dirección del flujo.

En la (Tabla 2) se comparan los resultados de días DCO y DSO, en este sentido los casos en que los Fr estuvieron entre 0.50 y 3 en al menos un horario se tuvo en cuenta, ya que la permanencia de la onda en el tiempo podría ser efímera, aunque no sería aplicable para los fines de esta investigación. Las cuatro poblaciones destacan la posibilidad de la existencia de este fenómeno en la zona investigada.

Al presentar los resultados obtenidos con la aplicación del SIASA se ha podido observar de forma cualitativa, que las dos poblaciones DCO1h y DSO1h, con estratificación de Fr entre 0.50 y 3 en los horarios de las 15, 18 y 21, presentaron diferencias notables, (Figura 2). En el período poco lluvioso se obtuvieron los valores de $Fr \geq 1$ en la mayoría de los casos de días con ondas. Mientras que, en el período lluvioso los valores de Fr estuvieron entre 0.50 a 1, principalmente en el trimestre mayo- julio. Con el SIASA se logró, además, un análisis exhaustivo de los índices CAPE, K y TT, favorables para el desarrollo de la convección de débil a moderada.

Se eligió el mes de octubre por presentar características propias de la transición a la temporada invernal, para hallar una relación entre el Fr y la CAPE (Figura 3), ambas muestras no presentaron correlación, este resultado demuestra que con valores de la CAPE moderado es

Tabla 2. Poblaciones de DCO y DSO

Meses	DCO1h	DSO1h	DCOth	DSOth
E	29	2	11	20
F	17	11	7	21
M	17	14	12	19
A	21	9	14	16
M	21	10	14	17
J	19	11	13	17
J	21	10	8	23
A	8	23	3	28
S	13	17	6	24
O	14	17	4	27
N	27	3	13	17
D	17	14	6	25

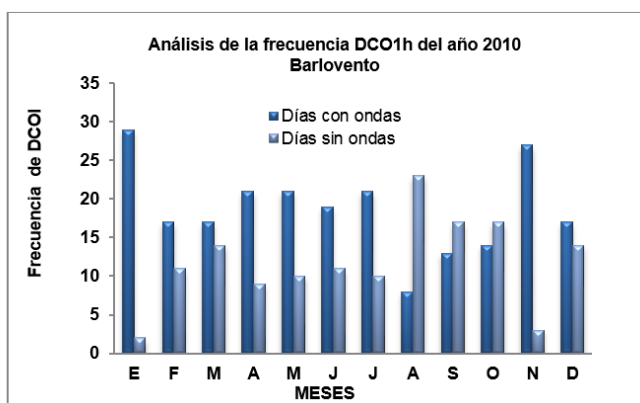
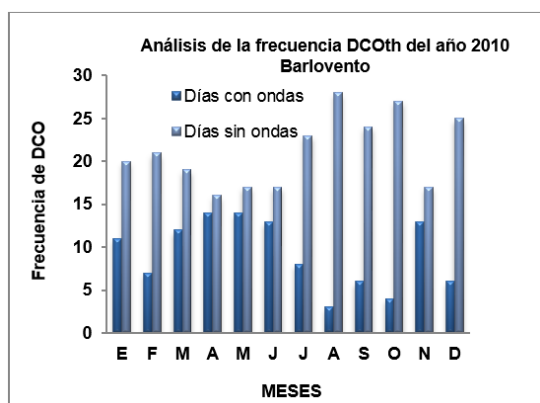


Figura 2. Análisis de la frecuencia de Fr con valores entre 0.5 y 3 a alturas de 1000-1500 m del año 2010

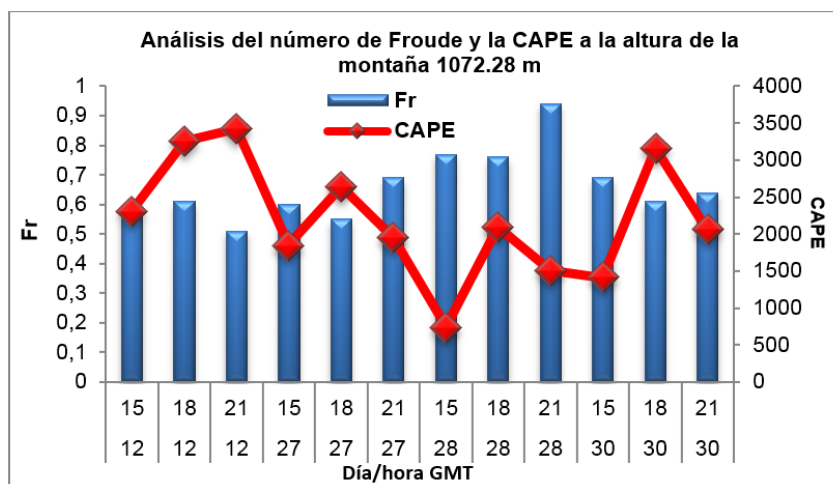


Figura 3. Comportamiento de Fr y la CAPE para el mes de octubre

probable que puedan presentarse ondas a sotavento en el lugar escogido.

Localizados los días con la posible ocurrencia de ondas de montaña, se procede a analizar las condiciones dinámicas y termodinámicas de un caso identificado, el 28 de octubre de 2010. Los sondeos interpolados de la atmósfera de ese día muestran una parcela de aire ligeramente inestable, con valores de la CAPE moderado y humedad relativa presente en las primeras capas de la atmósfera en los horarios de las 15, 18 y 21 UTC (Figura 4). El resto de los indicadores no revelaron la posibilidad de actividad convectiva intensa, mientras que, los valores de Fr estuvieron entre 0.80 y 0.90, cercano a la cima de la montaña.

Conforme a la altura de la montaña escogida para esta investigación, se probó que el número de Froude en muchos de los casos no superó el umbral encontrado en la literatura consultada. En este caso se obtuvieron valores de Fr entre 0.50 y 1 (Figura 5) en los tres horarios, demostrando que pueden presentarse ondas de montaña en el área de estudiada, confirmando lo hallado en la literatura para obstáculos tridimensionales de Smolarkiewicz, y Rotunno (1989) y Smith (2004).

De las simulaciones realizadas se obtuvieron mapas de altura del terreno, del Duct factor, así como, los cortes verticales en dirección Sur-Norte de las variables: velocidad horizontal (v), velocidad vertical (w), cuadrado de la frecuencia de Brünt-Väisälä (N^2) y humedad de la relativa (H_r). La inicialización se realizó con los datos del

modelo WRF de las 1200 Z generándose ondas lineales de montaña tres horas después.

En la (Figura 6) se puede apreciar que el mapa de altura del terreno del modelo coincide con las alturas del corte topográfico obtenido a través del sitio Web <http://www.altitude.nu/>.

Al analizar condiciones dinámicas mediante el Fr para todos los casos de estudio, calculadas en ambas laderas de la montaña, la frecuencia de Brünt-Väisälä (N^2) muestra oscilaciones verticales, tal como se ilustra en la (Figura 6 a) condición favorable para la ocurrencia de ondas de montaña.

Tras examinar los sondeos de las 1500-1800-2100 UTC (horario en que se observaron las ondas) en el entorno de La Africana, se ha determinado que los mejores niveles de presión para definir las capas estables y condicionalmente inestables son los indicados en la Tabla 3.0.

Los resultados de este estudio han mostrado que el DF es capaz de identificar zonas favorables para la propagación de ondas en la región de estudio (Figura 7b), las que se corresponden con los valores significativos de Fr, (Figura 7a). Al comparar ambas imágenes se puede apreciar que las zonas con mayor número de Froude se corresponden con las zonas en que se observaron las ondas.

Los cortes horizontales y verticales de la atmósfera muestran en dichos mapas la presencia de ondas de montaña. Hay que señalar que las condiciones de fronteras se consideraron fijas en el tope del modelo, lo cual trajo como consecuencia una reflexión total de las ondas

hacia abajo en el dominio, apreciándose un patrón de interferencia entre las ondas que se propagan hacia arriba y las reflejadas, lo cual se puede observar en el mapa del corte de la velocidad vertical de la atmósfera (Figura 8b).

Se comprobó que el modelo numérico utilizado demostró ser una herramienta útil para

representar y pronosticar correctamente las ondas de montaña. A pesar de las limitaciones que presenta el uso de la hipótesis hidrostática en las escalas espaciales sub-kilometro. Por consiguiente, permitió verificar la información obtenida con el SIASA y se cumplió el objetivo al detectar ondas de montaña en el área de

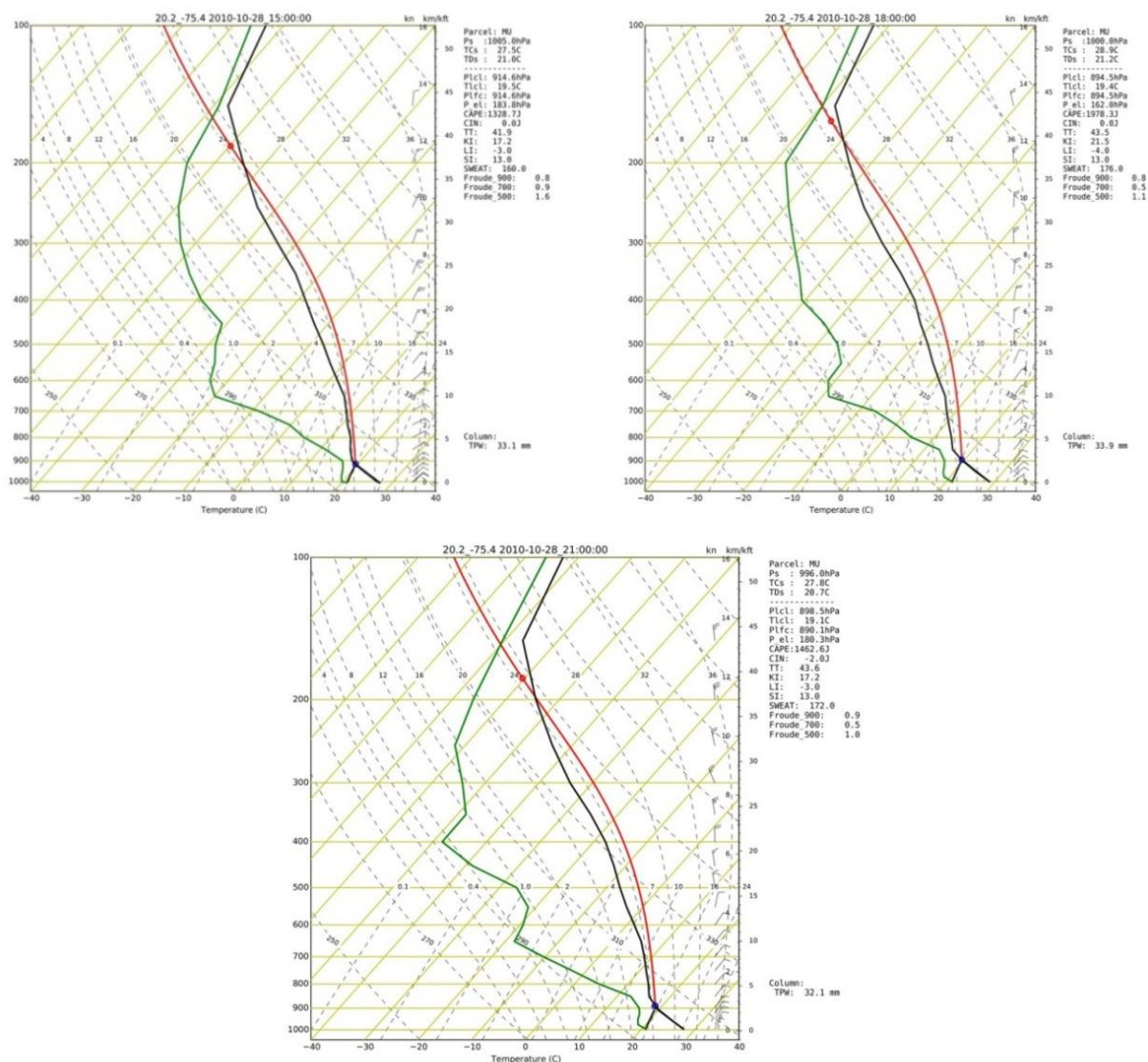


Figura 4. Sondeos interpolados de la atmósfera de las 15, 18, 21 UTC

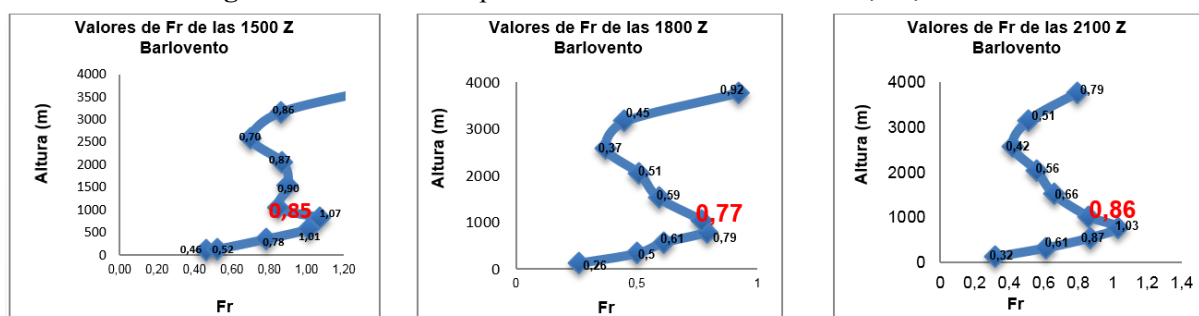


Figura 5. Valores de Fr en los horarios de las 15, 18 y 21 hora UTC desde superficie hasta 4000 m de altura, resaltados a la altura de la montaña

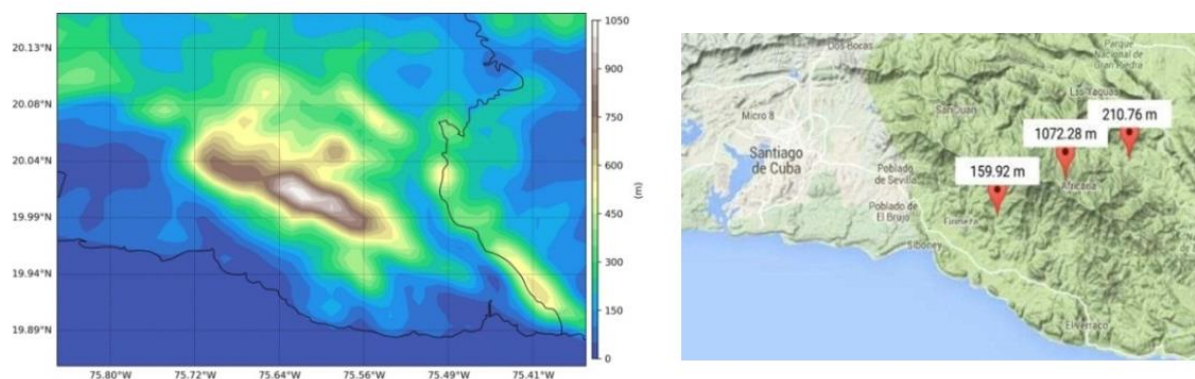


Figura 6. a) Mapa de altura de terreno b) Corte topográfico

Tabla 3. Niveles de presión que delimitan las capas estables y condicionalmente inestables, para el día 28 de octubre del 2010.

Fecha	Capa estable (hPa)	Capa condicionalmente inestable (hPa)
28-10-2010	900-700	650-300

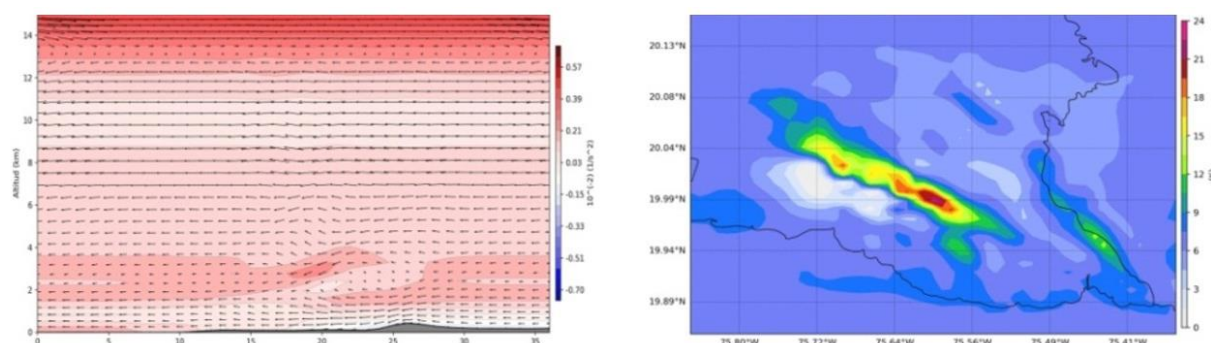


Figura 7. a) Mapa de valores de DF b) Mapa de valores de Fr

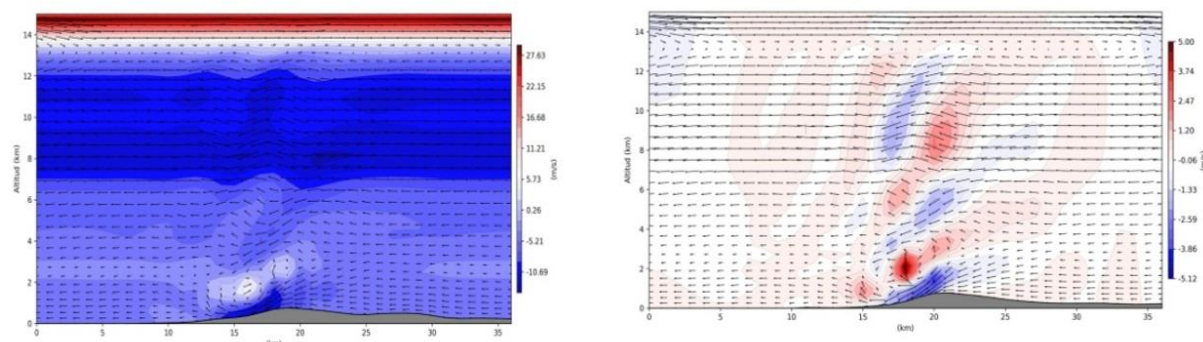


Figura 8. a) Mapa del corte de la velocidad horizontal b) Mapa del corte de la velocidad vertical
estudio en el caso analizado, del mismo modo se logró una breve caracterización de este fenómeno en dicha zona.

Fue preciso contar, además, con datos observados en el satélite meteorológico GOES 13 del canal infrarrojo, para comprobar si la nubosidad presente muestra relación con las salidas del modelo y los valores de Fr, si bien la imagen utilizada para este análisis no presenta una resolución adecuada para el estudio de ondas, se puede observar en ella el desarrollo de las estructuras típicas que a menudo están asociadas

El entorno sinóptico muestra un centro de altas presiones sobre el noroeste del océano Atlántico, extendiendo su dorsal hacia el norte de las Bahamas, influyendo sobre la mitad oriental del Golfo de México y el Mar Caribe, el cual generó condiciones de tiempo estable sobre Cuba, y vientos de región nordeste (Figura 9b), condición favorable para la génesis de ondas.

Se confeccionó un diagrama de flujo para ilustrar la metodología desarrollada y todo el

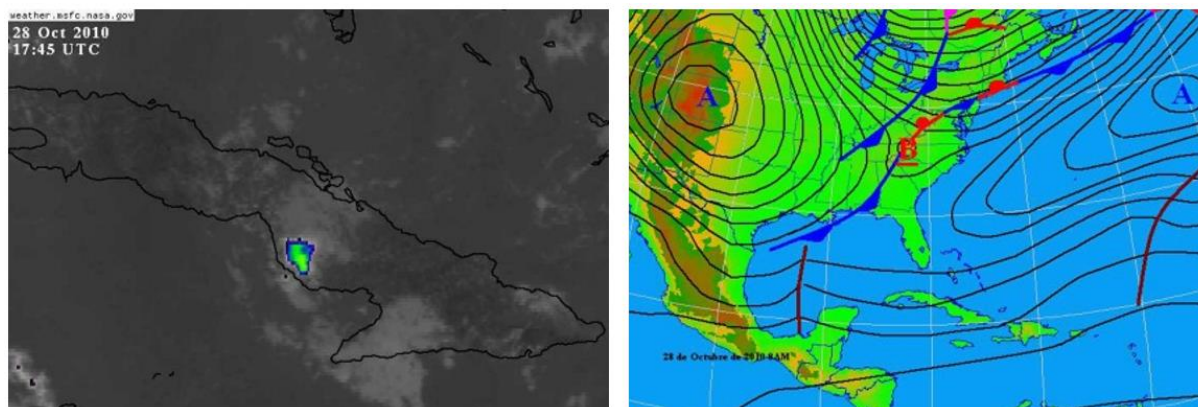


Figura 9. a) Imagen del satélite meteorológico GOES 13, canal infrarrojo lejano, resolución de 1 km b) Mapa sinóptico de las 12 Z

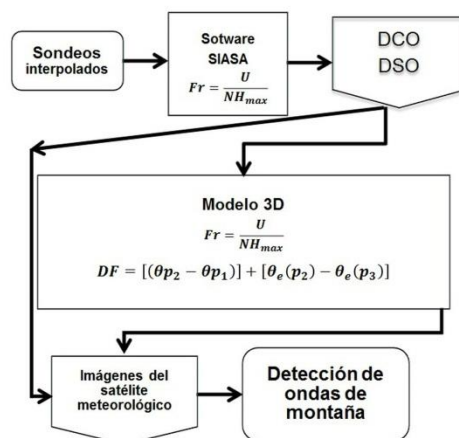


Figura 10. Diagrama de flujo de la metodología presentada

proceso de análisis que se llevó a cabo durante la investigación (Figura 10).

El aporte práctico se pone de manifiesto al poder incluir en los pronósticos especializados para zonas montañosas la posible ocurrencia de ondas de montaña, ya que esta información resulta de gran utilidad para la toma de decisiones en los trabajos de siembra de nubes orográficas, el turismo, los deportes de montaña, así como prevenir el tráfico aéreo por turbulencia atmosférica en dichas zonas, lo cual implica un ahorro tanto cualitativo como cuantitativo de los recursos materiales y humanos en estas labores.

CONCLUSIONES

Dado los resultados alcanzados, con el análisis de los sondeos a través del número de Froude y los parámetros de estabilidad con el SIASA, así como las corridas del modelo numérico, se puede concluir que:

Es posible la existencia de ondas de montaña en el área de estudio y ser utilizadas para la

aplicación de una red de generadores terrestres de yoduro de plata con el objetivo de elevar el reactivo hasta las alturas alrededor de la base de la nube.

Esta información puede ser aplicada para el desarrollo de actividades de gran interés socioeconómico en zonas montañosas, como son: el turismo, los deportes de montaña y la aviación.

Los valores de los números de Froude que se han obtenido son los apropiados, como se pueden observar en las gráficas anteriores, para detectar la formación de ondas en la ladera de sotavento.

El DF puede ser utilizado como indicador de zonas favorables para la formación de OM en el área de estudio.

El gradiente de temperatura potencial ha mostrado la existencia de un patrón de estabilidad estática común en los días con y sin ondas de montaña. Esto confirma que la presencia de estabilidad estática a sotavento del área estudiada es una condición necesaria pero no suficiente para la propagación de las ondas de montaña.

Los valores de la CAPE y de los índices KI y TT se han situado por debajo de los umbrales de alta probabilidad de formación de tormentas tanto en días con y sin ondas, confirmando la existencia de condiciones poco favorables para el desarrollo de convección profunda.

Las ondas de montaña ocurren con mayor frecuencia durante los meses de invierno, cuando el viento en altura es más intenso.

Los métodos desarrollados y aplicados en esta investigación pueden ser utilizados para predecir la ocurrencia de ondas de montañas y extenderlos a otros macizos montañosos del país.

RECOMENDACIONES

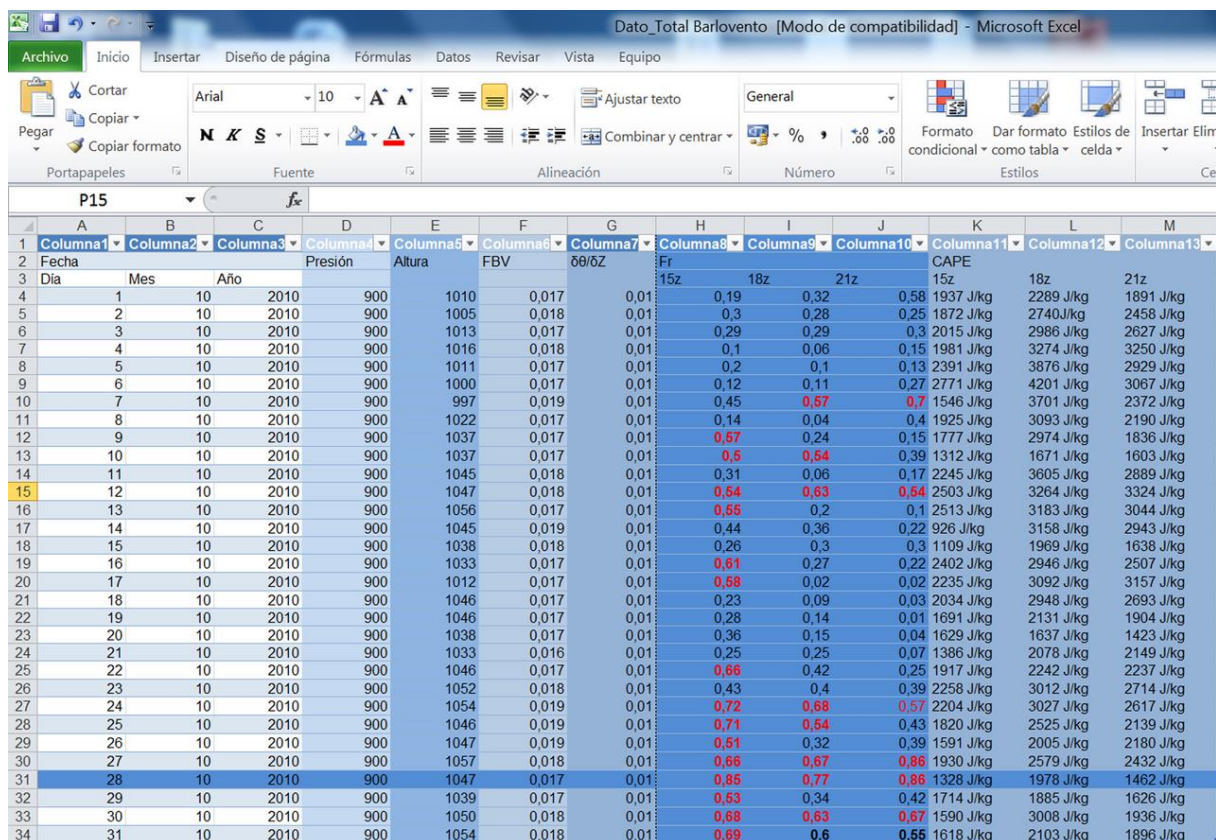
Continuar las investigaciones hasta alcanzar resultados totalmente confirmatorios de lo que se obtiene aquí preliminarmente, con más corridas del modelo y detecciones directa de la presencia de ondas de montaña a través de la nubosidad correspondiente mediante imágenes de satélite meteorológico.

REFERENCIAS

- Administración Nacional Oceánica y Atmosférica NOAA, 1970, Air Resources Laboratory Data Archive, disponible: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica NOAA, 1970, Air Resources Laboratory Data Archive, disponible: <http://www.arl.noaa.gov/READYamet.php> . (Mayo 9, 2015)
- Altitude.nu, disponible: nu, disponible: <http://www.altitude.nu/> (Abril 23, 2015)
- Clark, T., Hall, W. & Banta, R., 1994. "Two and three dimensional simulations of the 9 January 1989 severe Boulder windstorm": comparison with observations. *Journal of the Atmospheric Sciences* 51, 2317-2343.
- Doyle, J., Durran, D., 2002. "The dynamics of mountain wave induced rotors". *Journal of the Atmospheric Sciences* 59, p186. 16p.
- Doyle, J., Volkert, H., Dörnbrack, A., Hoinka, K. & Hogan, T., 2002. "Aircraft measurements and numerical simulations of mountain waves over the central Alps": A pre-MAP test case. *RMetS* 128, 2175-2184.
- Gaffin, D., 1999. "Wake Low Severe Wind Events in the Mississippi River Valley": A Case Study of Two Contrasting Events. *American Meteorological Society Journals online* 14, 581-603.
- Gaffin, D., Parker, S. & Kirkwood, P., 2003. "An Unexpectedly Heavy and Complex Snowfall Event across the Southern Appalachian Region". *WAF* 18.224-235.
- Gallardo, Y., García, Y., Jiménez, L. & Álvarez, C. 2017. Software Sistema de Análisis de Sondeos Aerológicos (SIASA). Versión 1, (LINUX), Python, Cuba.
- Garvert, M., Smull, B. & Mass, C., 2007. "Multiscale mountain waves influencing a major orographic precipitation event". *American Meteorological Society Journals*.
- Koch, S., O'Handley, C., 1997. "Operational forecasting and detection of mesoscale gravity waves". *Weather and Forecasting* 12, 253-281.
- Koch, S. E. & Saleeby, S. 2001. An automated system for the analysis of gravity waves and other mesoscale phenomena. *Weather and Forecasting* , 16, 661-679.
- Koletsis, I., Lagouvardos, K., Kotroni, V., & Bartzokas, A., 2009. "Numerical study of a downslope windstorm in Northwestern Greece". *Atmospheric Research* 94, 178-193.
- Lilly, D., 1978. A Severe Downslope Windstorm and Aircraft Turbulence Event Induced by a Mountain Wave. *AMS* 35, 59-77.
- Lindzen, R. A., 1990. Dynamics in atmospheric physics, Cambridge University Press. ed. Cambridge, 324 p, Available: <https://books.google.es>
- Lindzen, R., Tung, K., 1976. "Banded convective activity and ducted gravity waves. *Monthly Weather Review*". *American Meteorological Society Journals online* 104, 1602-1617.
- Linés, A., n.d. Geographicalia. 1982, No 13-16 - Dialnet [WWW Document]. URL <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/6454> (accessed 4.2.17).
- Lozano, M., WRF simulation of the atmospheric conditions in some aircraft accidents. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero en Técnica Aeronáutica, especialidad Aeronavegación, Escola d'Enginyeria de

- Telecomunicació Aeronàutica de Castelldefels, Universitat Politècnica de Catalunya, 2013
- Moreno, M., Gil, M., 2003. "Análisis de la siniestralidad aérea por causa meteorológica (1970-1999)". *Investigaciones Geográficas*, 30, 7-25. <https://doi.org/10.14198/INGEO2003.30.06>
- Morfa, Y. A. Modelo numérico 3D para el pronóstico inmediato a escala Meso- α . Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas Facultad de Medio Ambiente, La Habana, Cuba, 2016.
- Nappo, C., 2002. *An introduction to atmospheric gravity waves*, 102 p, 276, 1st Edición. Ed, ISSN 978-0-08-049166-0. Academic Press, London.
- Orlanski, I., 1975. "A rational subdivision of scales for atmospheric processes". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56(5), 527-530.
- Posada, R.: Caracterización de las ondas de montaña en situaciones de precipitación invernal, Doctorado. Universidad de León, Península Ibérica, 2013, Universidad de León, Península Ibérica, 2013, <http://hdl.handle.net/10612/2224> , última visita, mayo 9, 2015
- Roe, G., 2005. "Orographic precipitation". *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 33:645-671, 645-671. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122541>
- Shutts, G., 1992. "Observations and Numerical Model Simulation of a Partially Trapped Lee Wave over the Welsh Mountains". *American Meteorological Society Journals online* 126, 2056-2066, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120<:OANMSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120<:OANMSO>2.0.CO;2).
- Smith, S., 2004. "Observations and simulations of the 8 November 1999 MAP: mountain wave case". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130, 1305-1325. <https://doi.org/10.1256/qj.03.112>
- Smolarkiewicz, P. K. & Rotunno, R. 1989. Low Froude number flow past three-dimensional obstacles. Part I: Baroclinically generated lee vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46, 1154-1164.
- Zhang, F., Koch, S., Davis, C. & Kaplan, M., 2001, "Wavelet analysis and the governing dynamics of a large-amplitude mesoscale gravity wave event along the East Coast of the United States". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 127, 2209-2245. <https://doi.org/10.1002/qj.49712757702>

ANEXO 1



Columna1	Columna2	Columna3	Columna4	Columna5	Columna6	Columna7	Columna8	Columna9	Columna10	Columna11	Columna12	Columna13
Fecha			Presión	Altura	FBV	δθ/δZ	Fr	18z	21z	CAPE		
1	1	10	2010	900	1010	0.017	0.01	0.19	0.32	0.58	1937 J/kg	1891 J/kg
2	2	10	2010	900	1005	0.018	0.01	0.3	0.28	0.25	1872 J/kg	2740 J/kg
3	3	10	2010	900	1013	0.017	0.01	0.29	0.29	0.3	2015 J/kg	2986 J/kg
4	4	10	2010	900	1016	0.018	0.01	0.1	0.06	0.15	1981 J/kg	3274 J/kg
5	5	10	2010	900	1011	0.017	0.01	0.2	0.1	0.13	2391 J/kg	3876 J/kg
6	6	10	2010	900	1000	0.017	0.01	0.12	0.11	0.27	2771 J/kg	4201 J/kg
7	7	10	2010	900	997	0.019	0.01	0.45	0.67	0.7	1546 J/kg	3701 J/kg
8	8	10	2010	900	1022	0.017	0.01	0.14	0.04	0.4	1925 J/kg	3093 J/kg
9	9	10	2010	900	1037	0.017	0.01	0.57	0.24	0.15	1777 J/kg	2974 J/kg
10	10	10	2010	900	1037	0.017	0.01	0.5	0.54	0.39	1312 J/kg	1671 J/kg
11	11	10	2010	900	1045	0.018	0.01	0.31	0.06	0.17	2245 J/kg	3605 J/kg
12	12	10	2010	900	1047	0.018	0.01	0.54	0.63	0.54	2503 J/kg	3264 J/kg
13	13	10	2010	900	1056	0.017	0.01	0.55	0.2	0.1	2513 J/kg	3183 J/kg
14	14	10	2010	900	1045	0.019	0.01	0.44	0.36	0.22	926 J/kg	3158 J/kg
15	15	10	2010	900	1038	0.018	0.01	0.26	0.3	0.3	1109 J/kg	1969 J/kg
16	16	10	2010	900	1033	0.017	0.01	0.61	0.27	0.22	2402 J/kg	2946 J/kg
17	17	10	2010	900	1012	0.017	0.01	0.58	0.02	0.02	2235 J/kg	3092 J/kg
18	18	10	2010	900	1046	0.017	0.01	0.23	0.09	0.03	2034 J/kg	2948 J/kg
19	19	10	2010	900	1046	0.017	0.01	0.28	0.14	0.01	1691 J/kg	2131 J/kg
20	20	10	2010	900	1038	0.017	0.01	0.36	0.15	0.04	1629 J/kg	1637 J/kg
21	21	10	2010	900	1033	0.016	0.01	0.25	0.25	0.07	1386 J/kg	2078 J/kg
22	22	10	2010	900	1046	0.017	0.01	0.66	0.42	0.25	1917 J/kg	2242 J/kg
23	23	10	2010	900	1052	0.018	0.01	0.43	0.4	0.39	2258 J/kg	3012 J/kg
24	24	10	2010	900	1054	0.019	0.01	0.72	0.68	0.57	2204 J/kg	3027 J/kg
25	25	10	2010	900	1046	0.019	0.01	0.71	0.54	0.43	1820 J/kg	2525 J/kg
26	26	10	2010	900	1047	0.019	0.01	0.51	0.32	0.39	1591 J/kg	2005 J/kg
27	27	10	2010	900	1057	0.018	0.01	0.66	0.67	0.86	1930 J/kg	2579 J/kg
28	28	10	2010	900	1047	0.017	0.01	0.85	0.77	0.86	1328 J/kg	1978 J/kg
29	29	10	2010	900	1039	0.017	0.01	0.53	0.34	0.42	1714 J/kg	1885 J/kg
30	30	10	2010	900	1050	0.018	0.01	0.68	0.63	0.67	1590 J/kg	3008 J/kg
31	31	10	2010	900	1054	0.018	0.01	0.69	0.6	0.55	1618 J/kg	2103 J/kg

Figura 11. Archivo Excel con datos de presión, altura, N, Fr, el gradiente de la temperatura potencial y la CAPE del mes de octubre

ANEXO 2.1

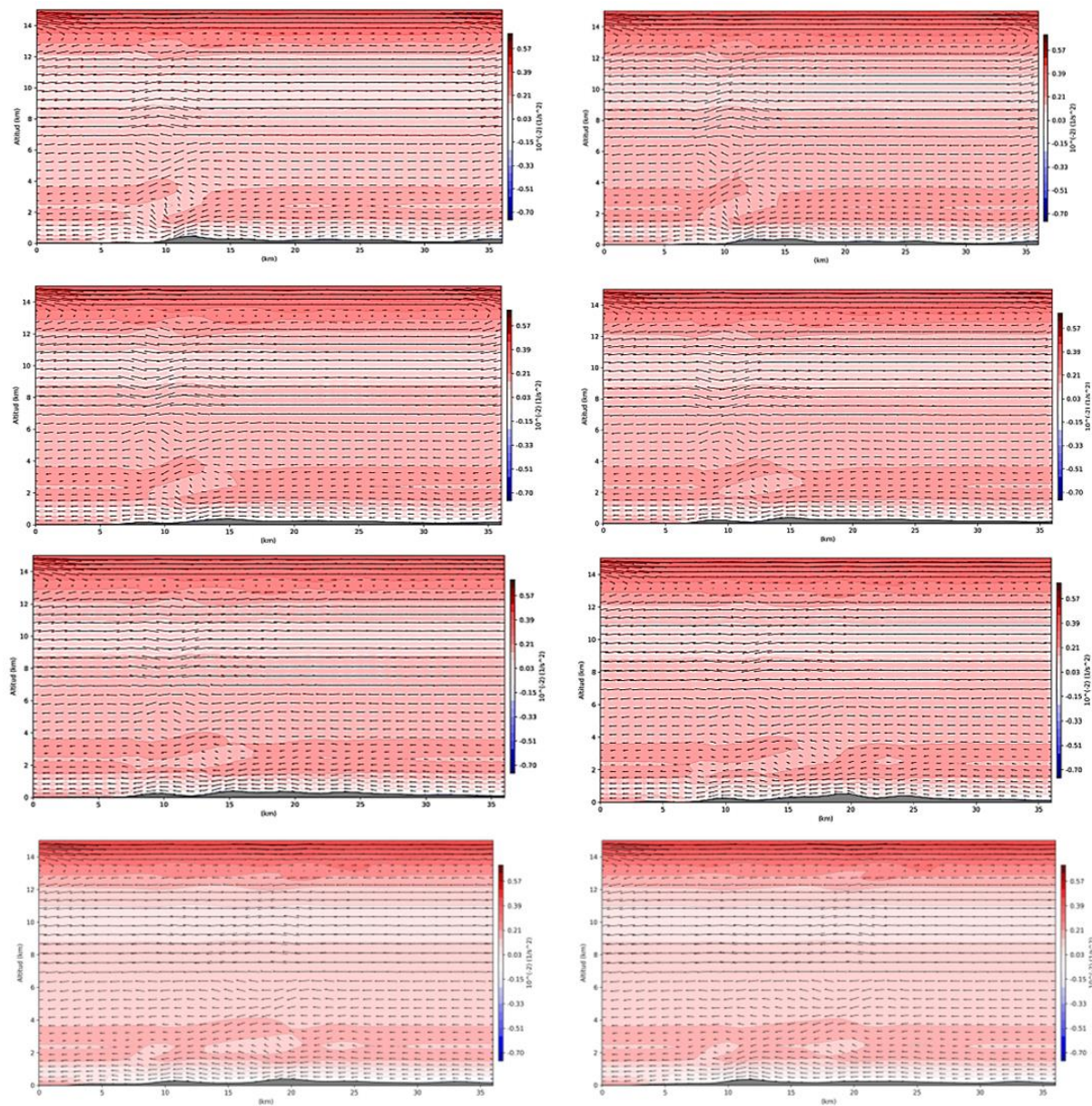


Figura 12. Frecuencia de Brunt Väisälä N^2 caso estudio 28-10-10

ANEXO 2.2

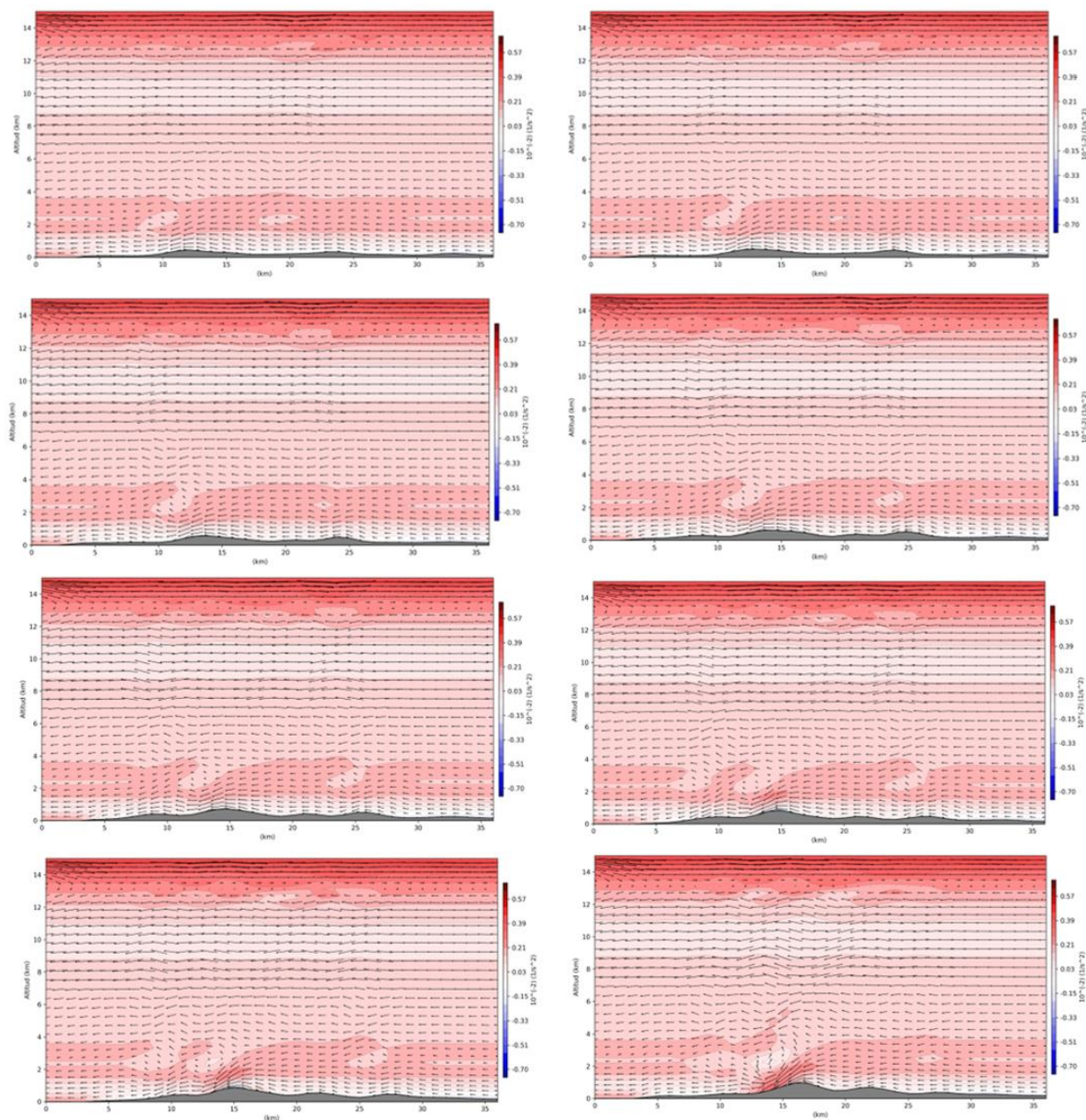


Figura 13. Frecuencia de Brunt Väisälä N^2 caso estudio 28-10-10

ANEXO 2.3

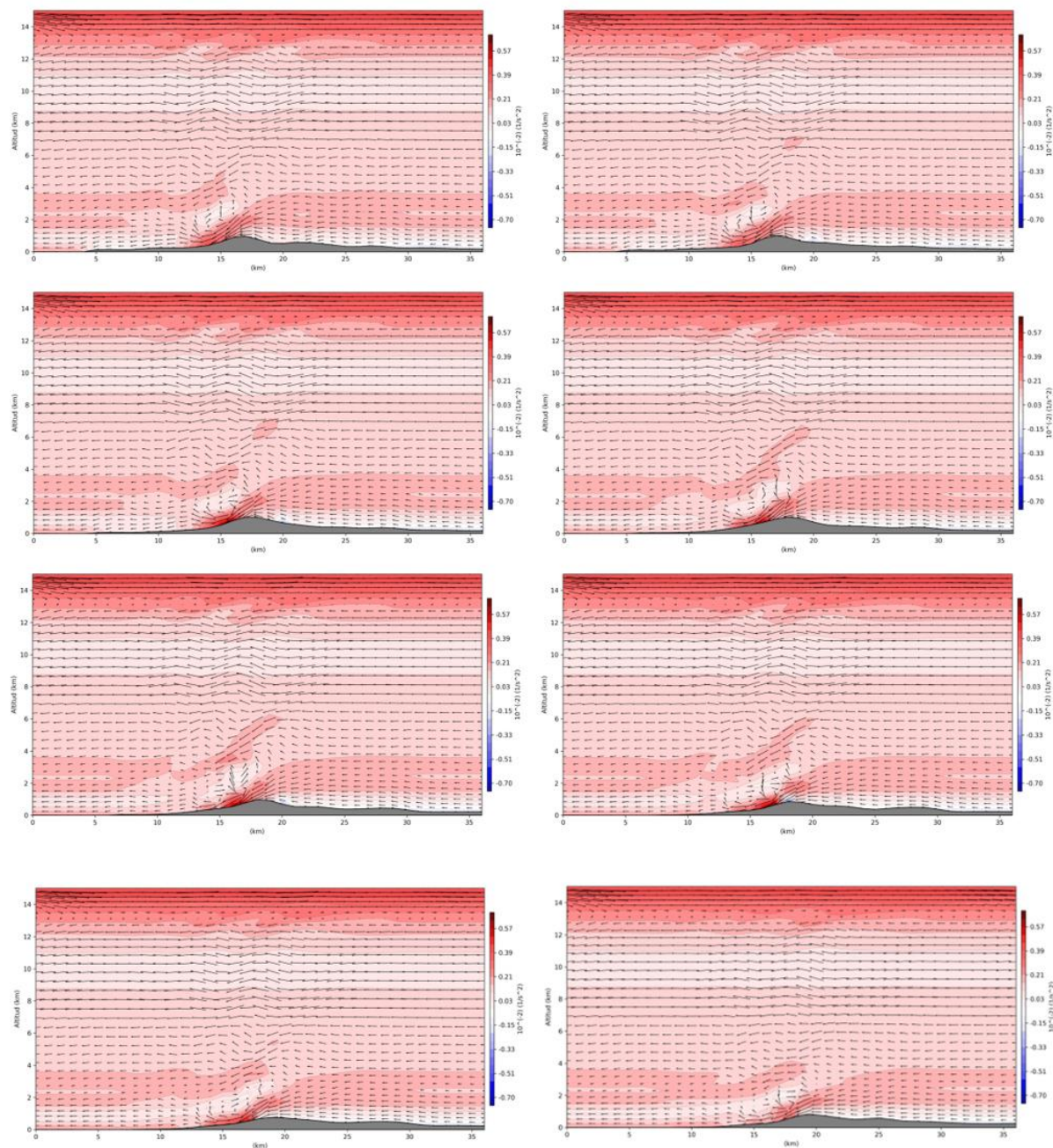


Figura 14. Frecuencia de Brunt Väisälä N^2 caso estudio 28-10-10

ANEXO 2.4

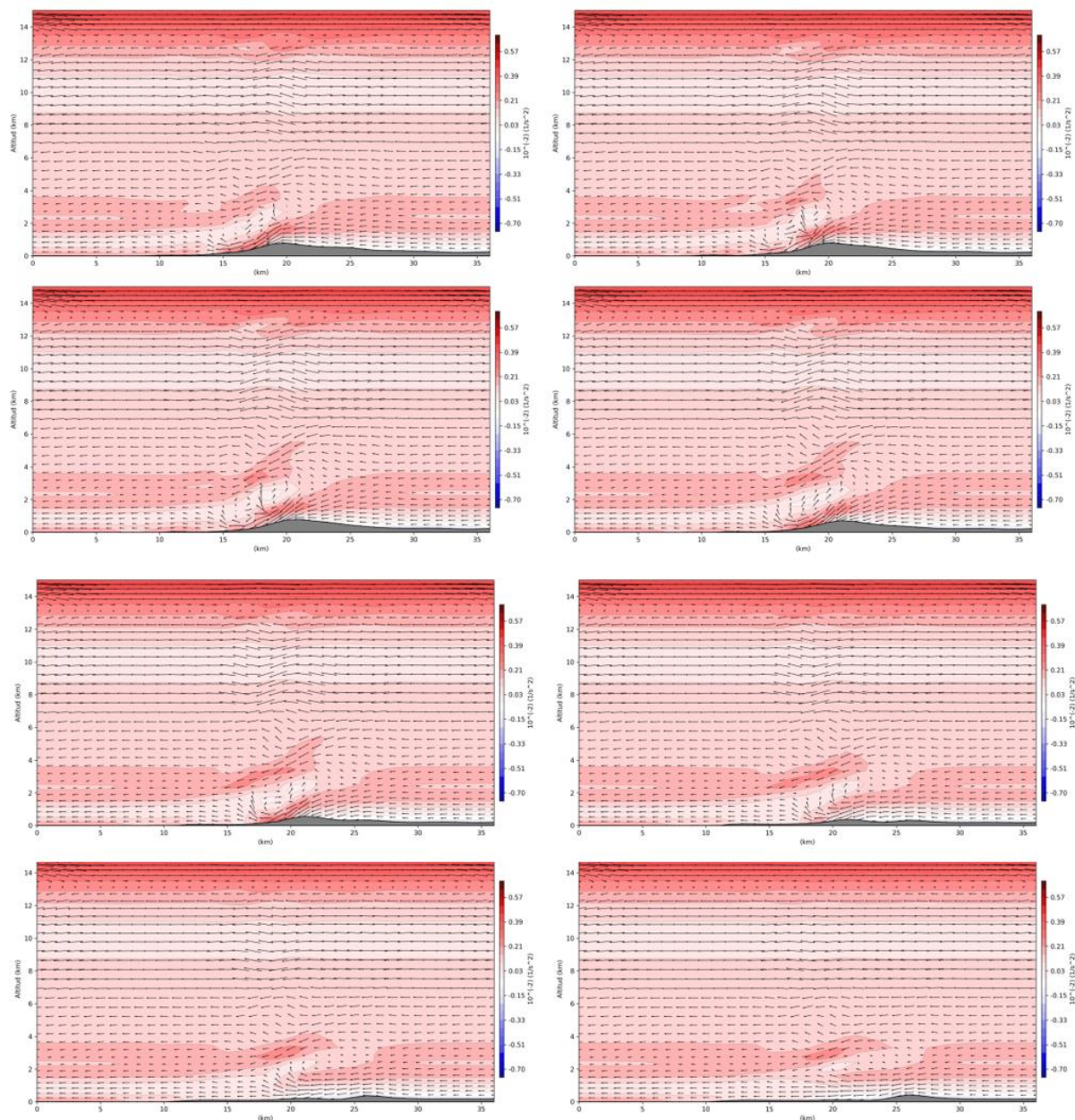


Figura 15. Frecuencia de Brunt Väisälä N^2 caso estudio 28-10-10

ANEXO 3.1

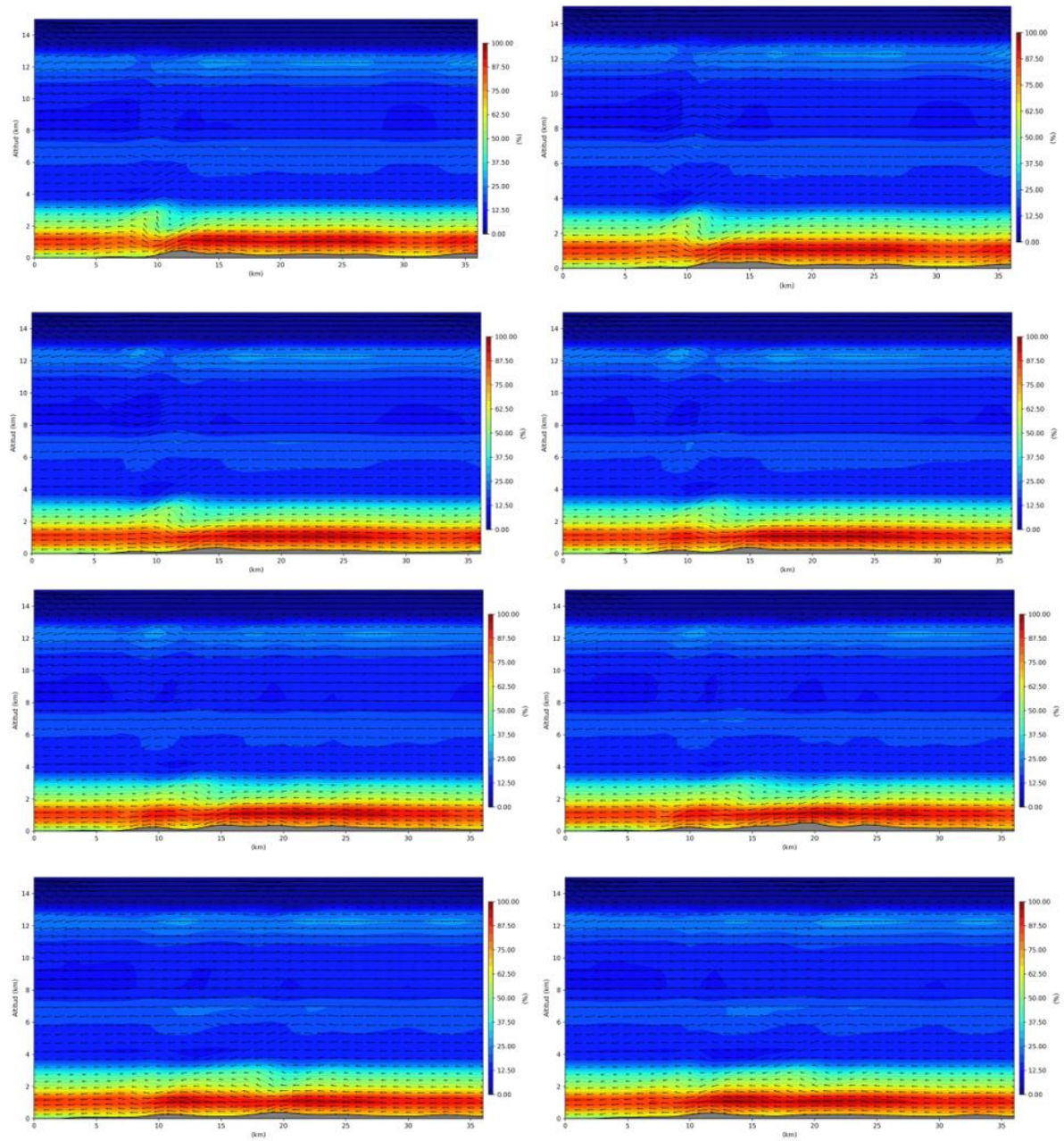


Figura 16. Humedad relativa caso estudio 28-10-10

ANEXO 4.1

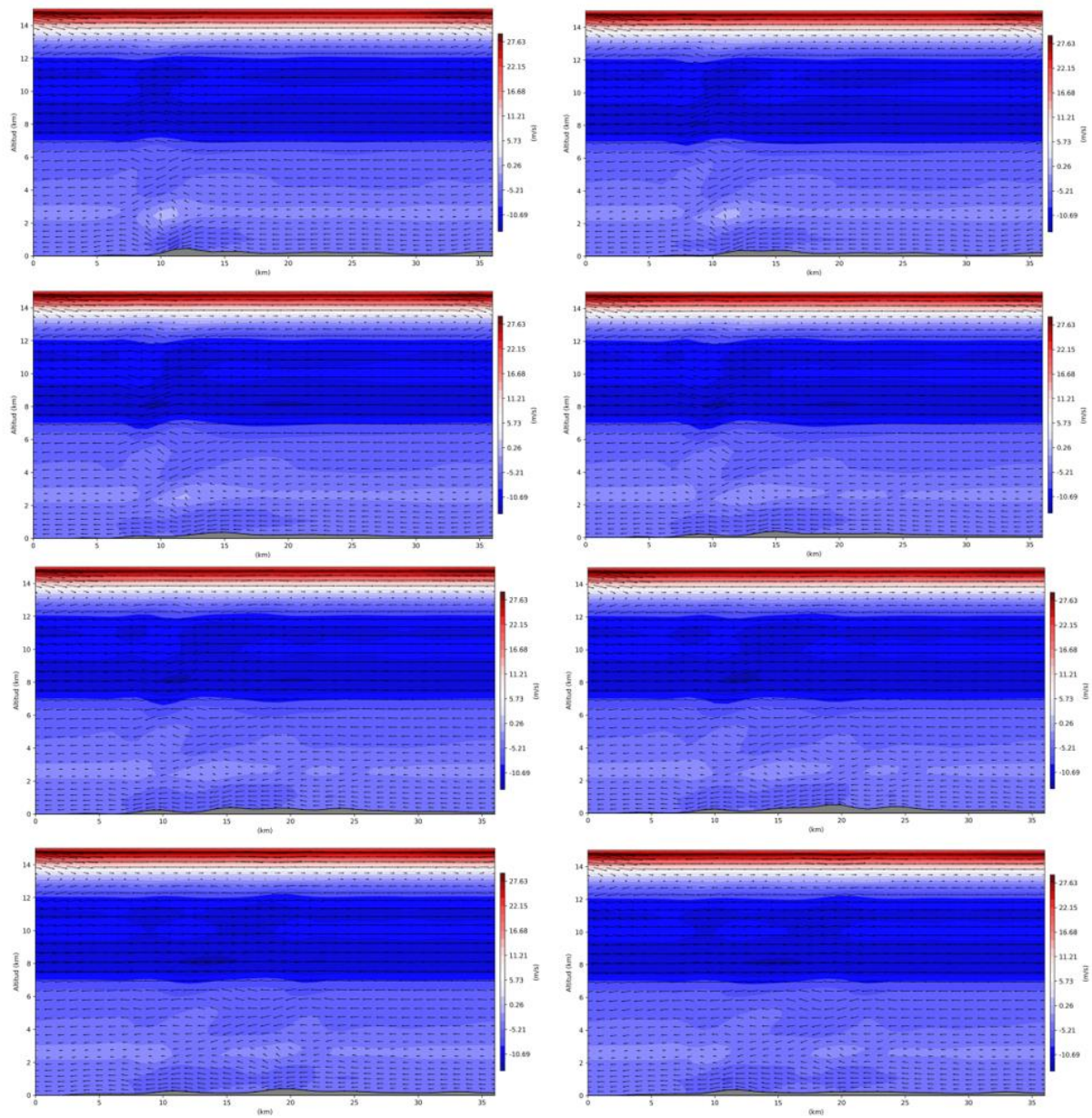


Figura 17. Velocidad horizontal caso estudio 28-10-10

ANEXO 4.2

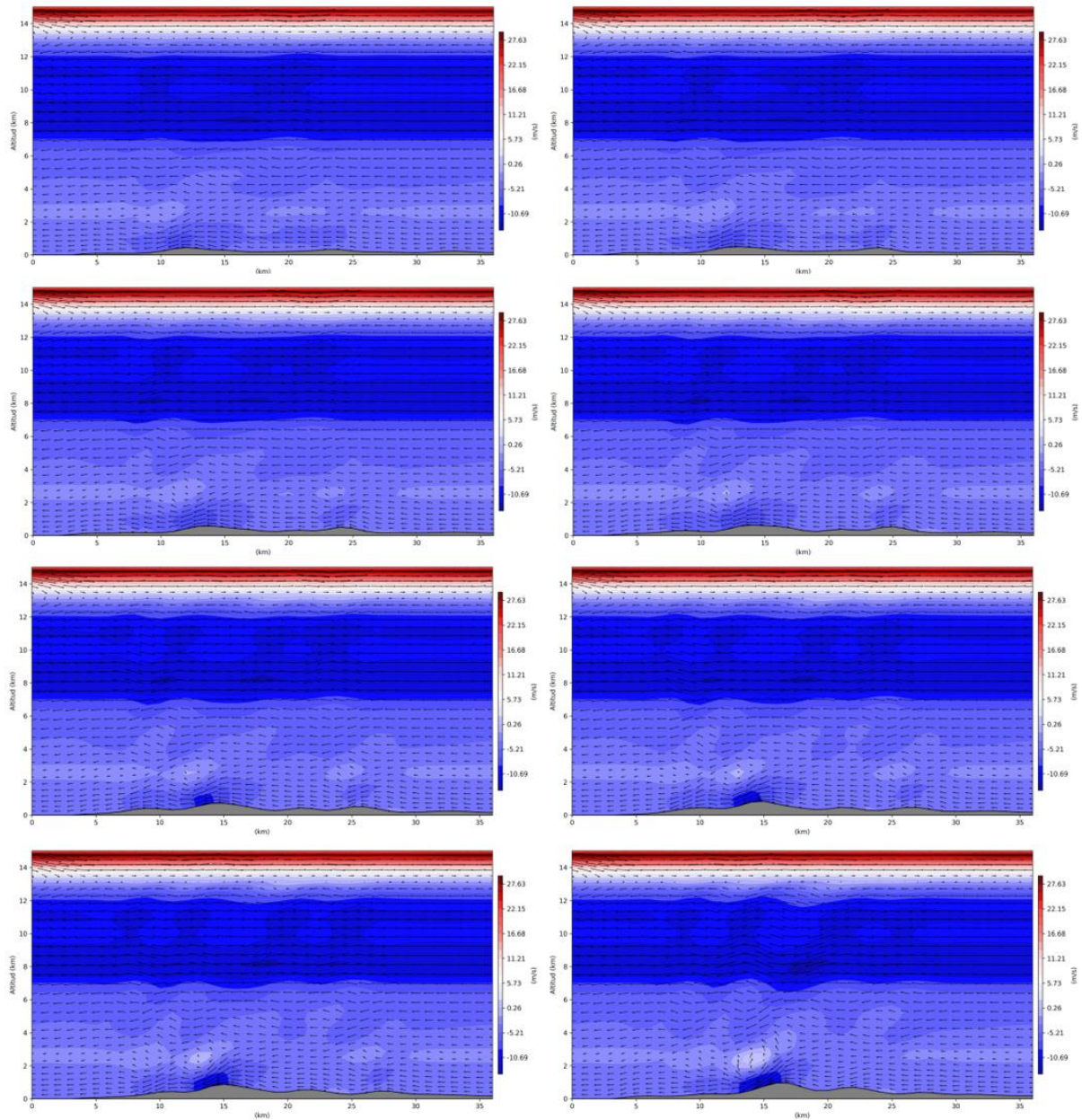


Figura 18. Velocidad horizontal caso estudio 28-10-10

ANEXO 4.3

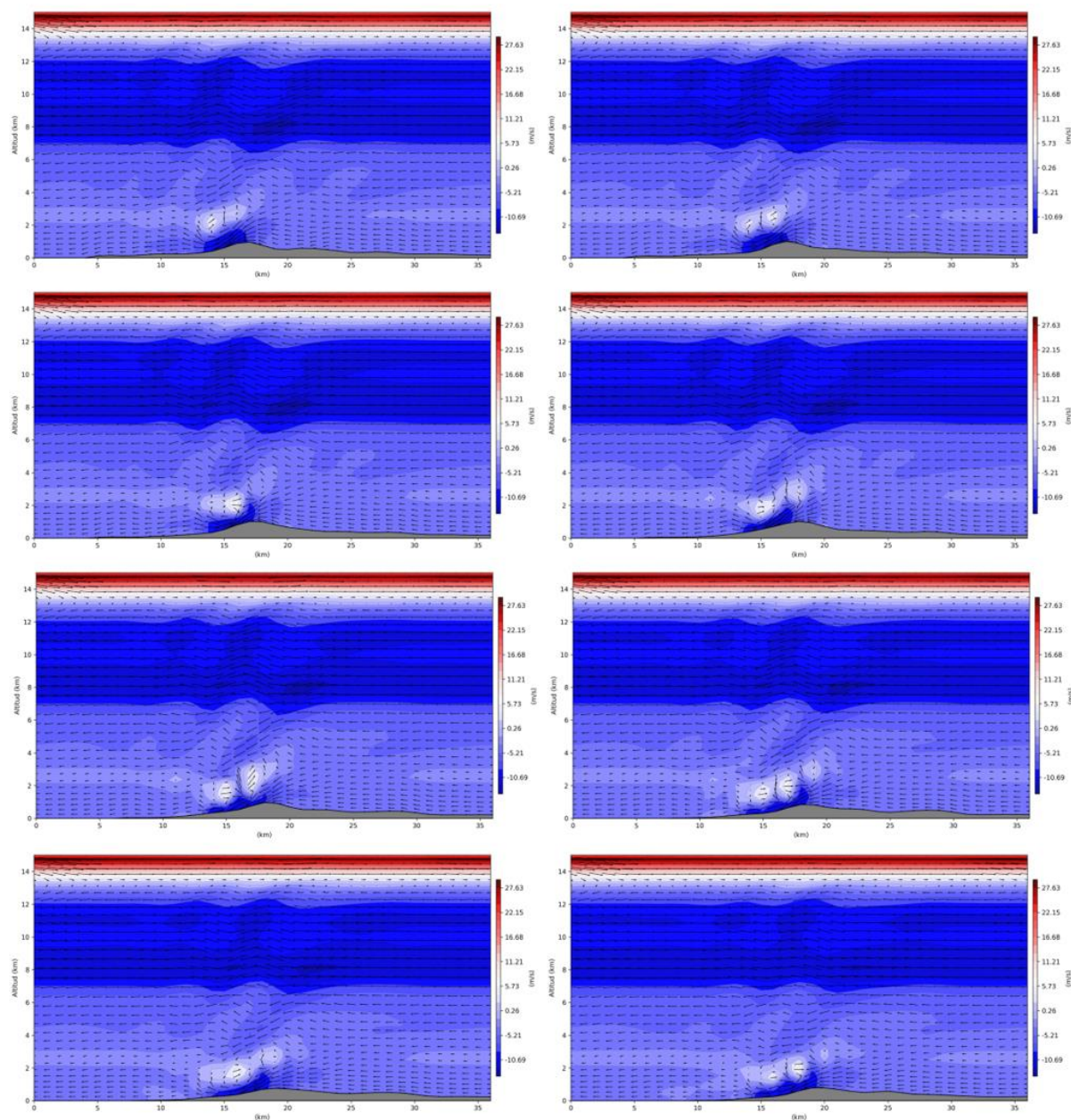


Figura 19. Velocidad horizontal caso estudio 28-10-10

ANEXO 4.4

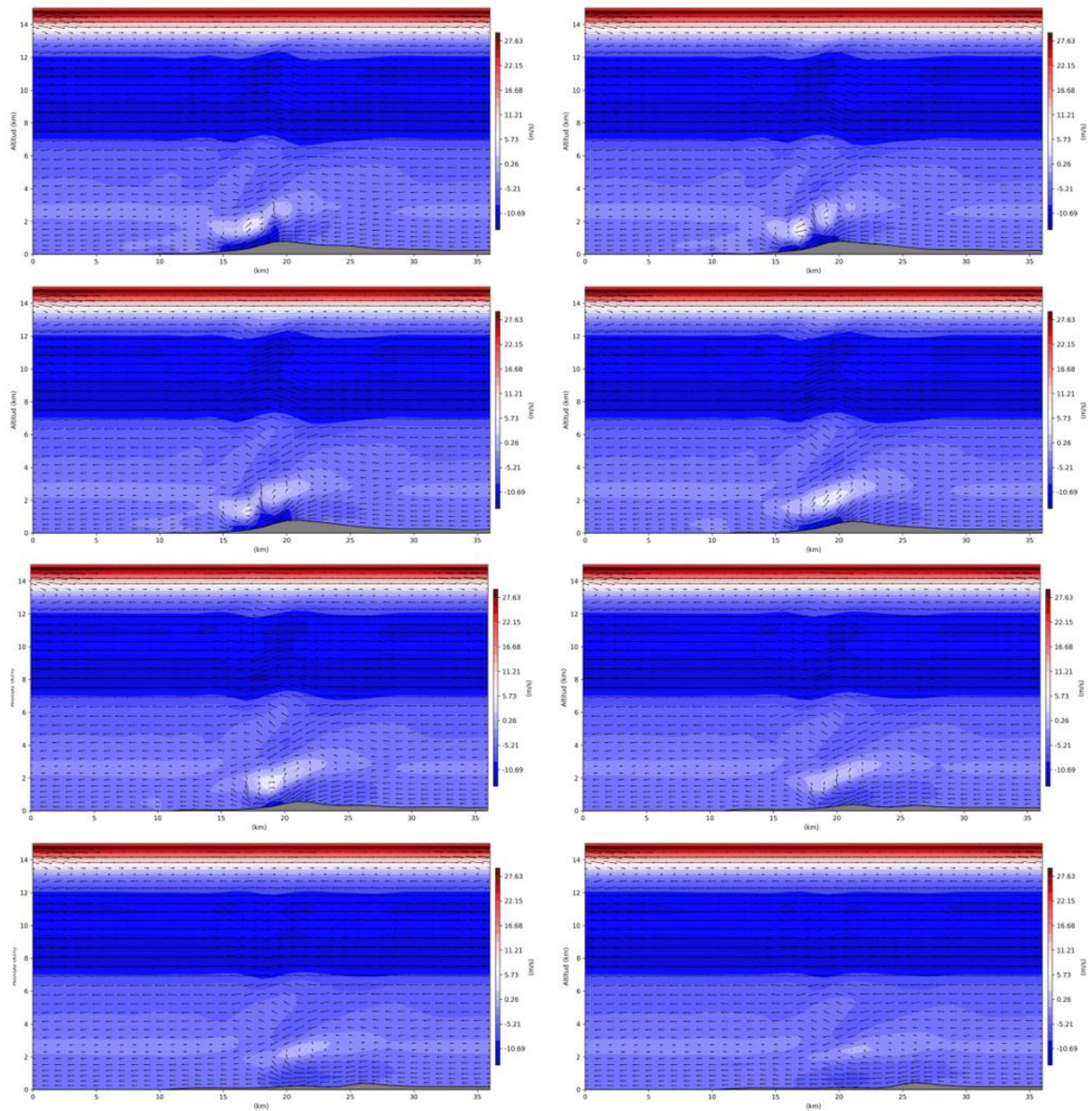


Figura 20. Velocidad horizontal caso estudio 28-10-10

ANEXO 5.1

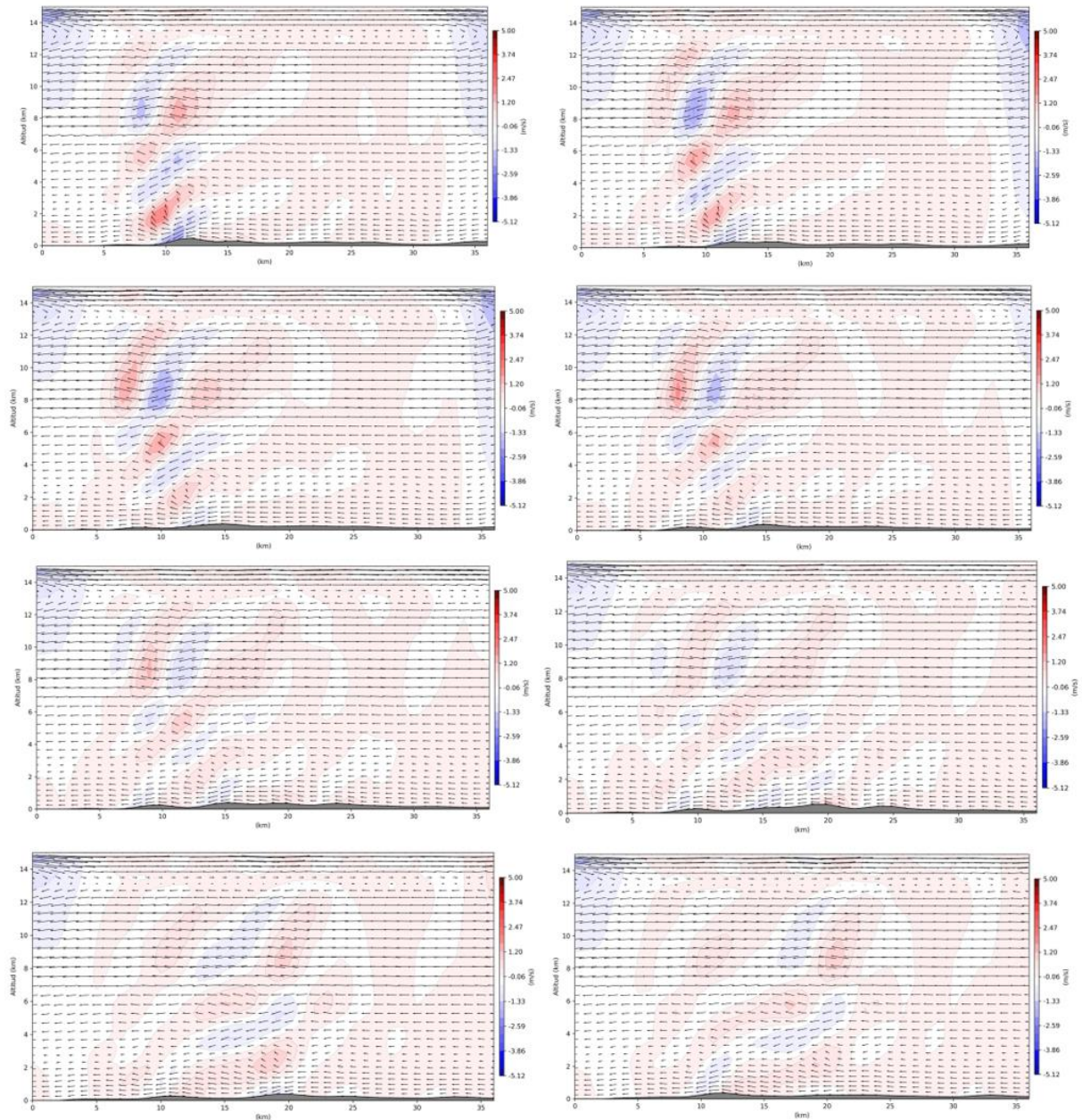


Figura 21. Velocidad vertical caso de estudio 28-10-10

ANEXO 5.2

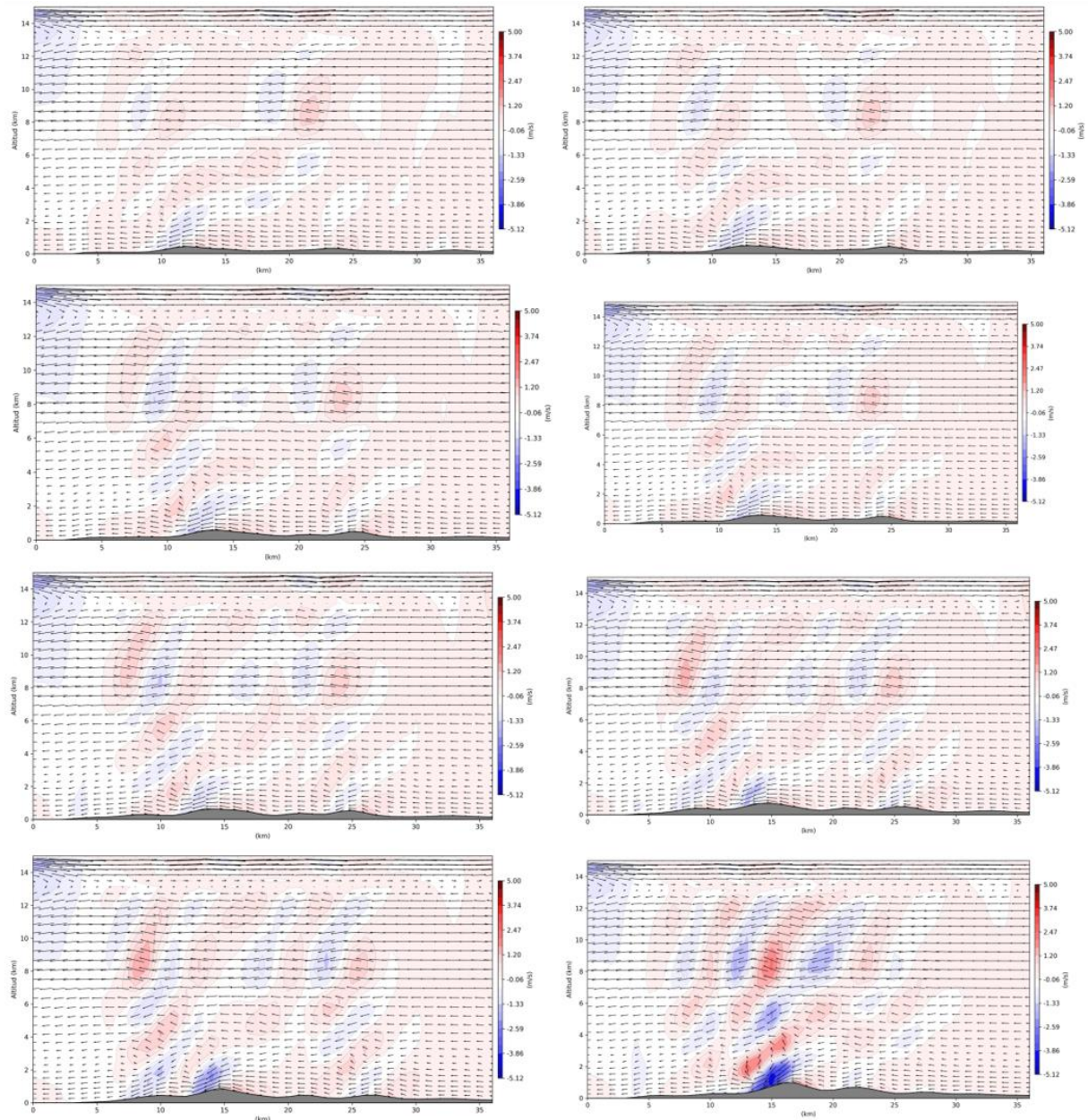


Figura 22. Velocidad vertical caso de estudio 28-10-10

ANEXO 5.3

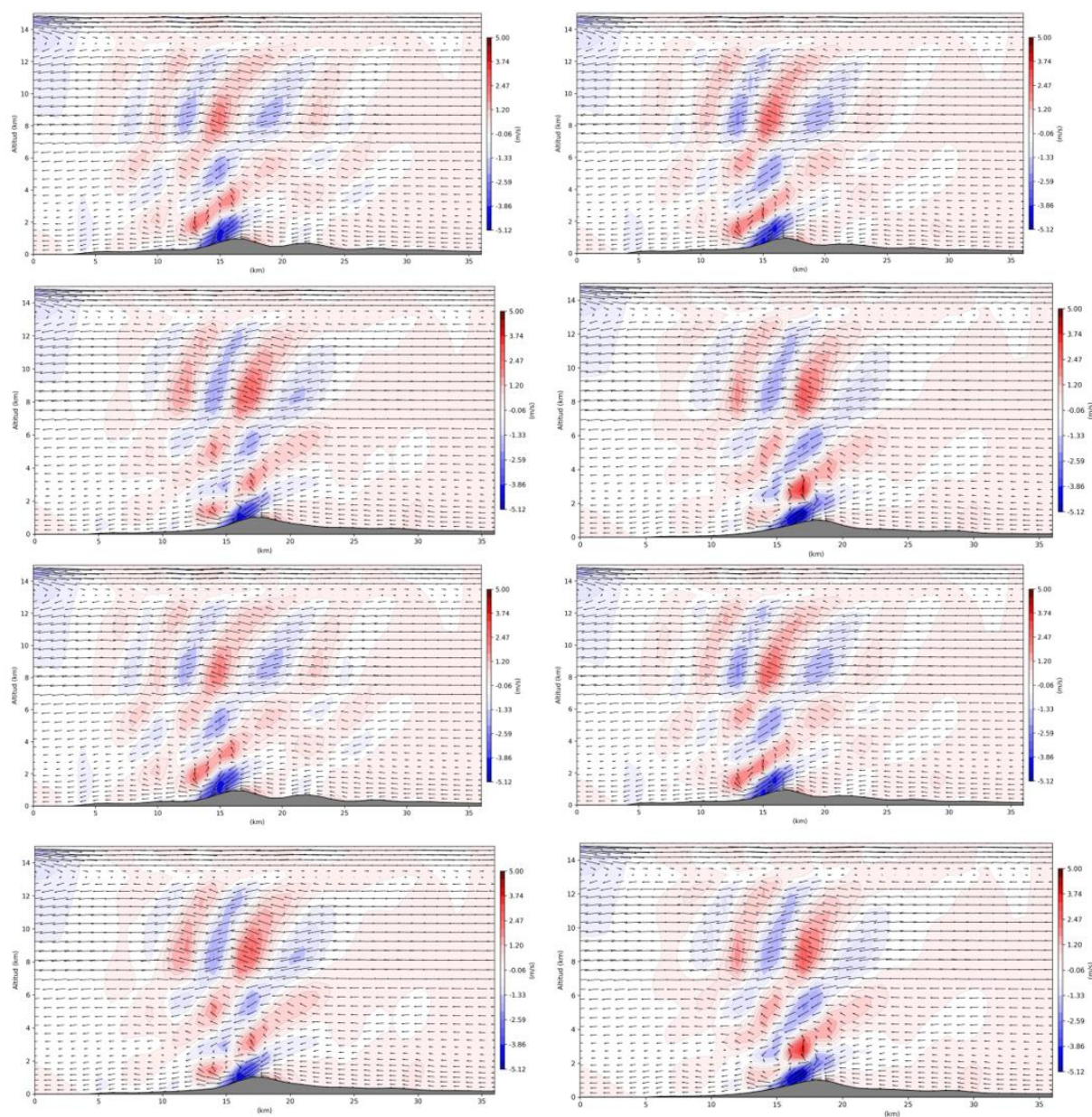


Figura 23. Velocidad vertical caso de estudio 28-10-10

ANEXO 5.4

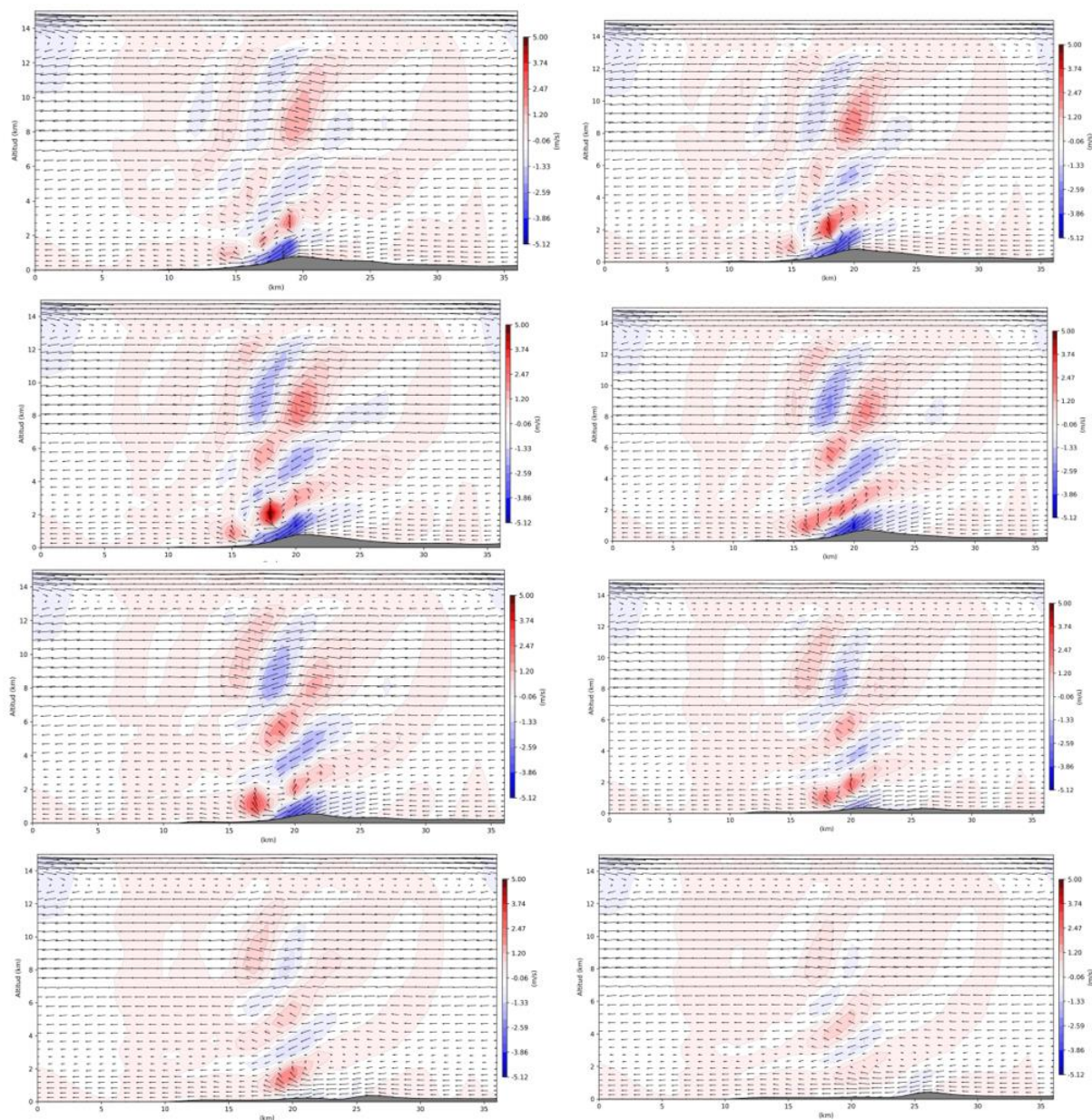


Figura 24. Velocidad vertical caso de estudio 28-10-10

ANEXO 6

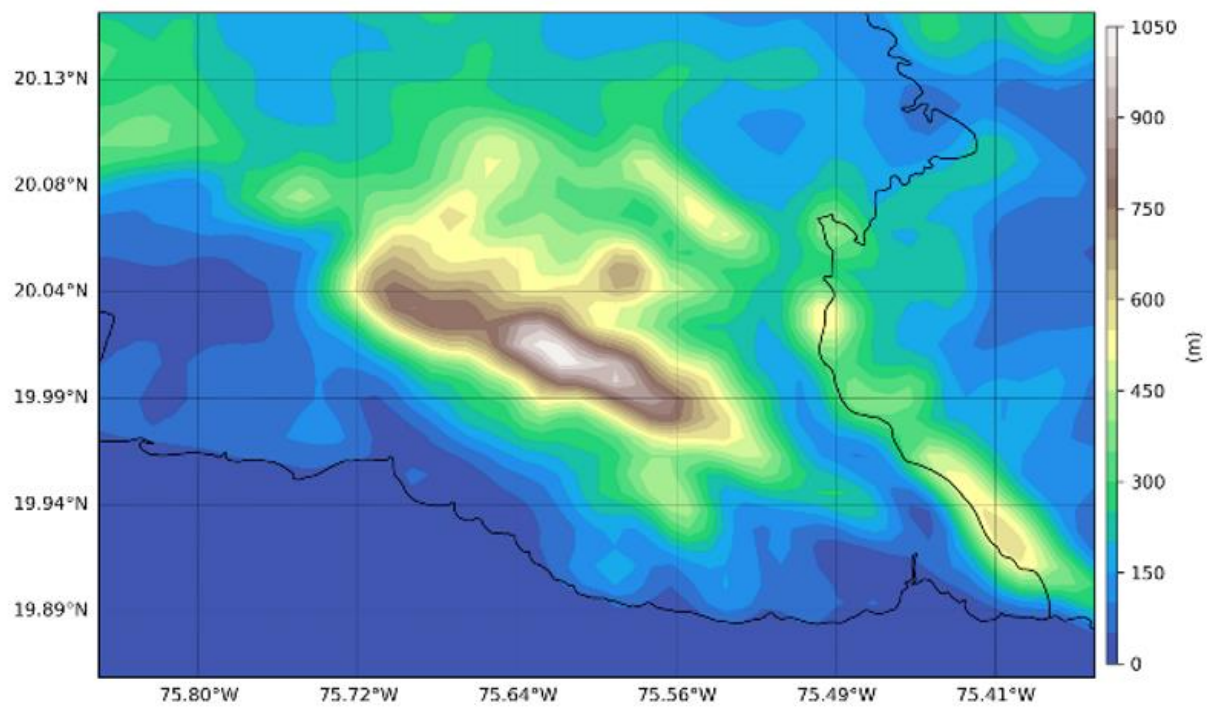


Figura 25. Mapa de terreno del área estudiada

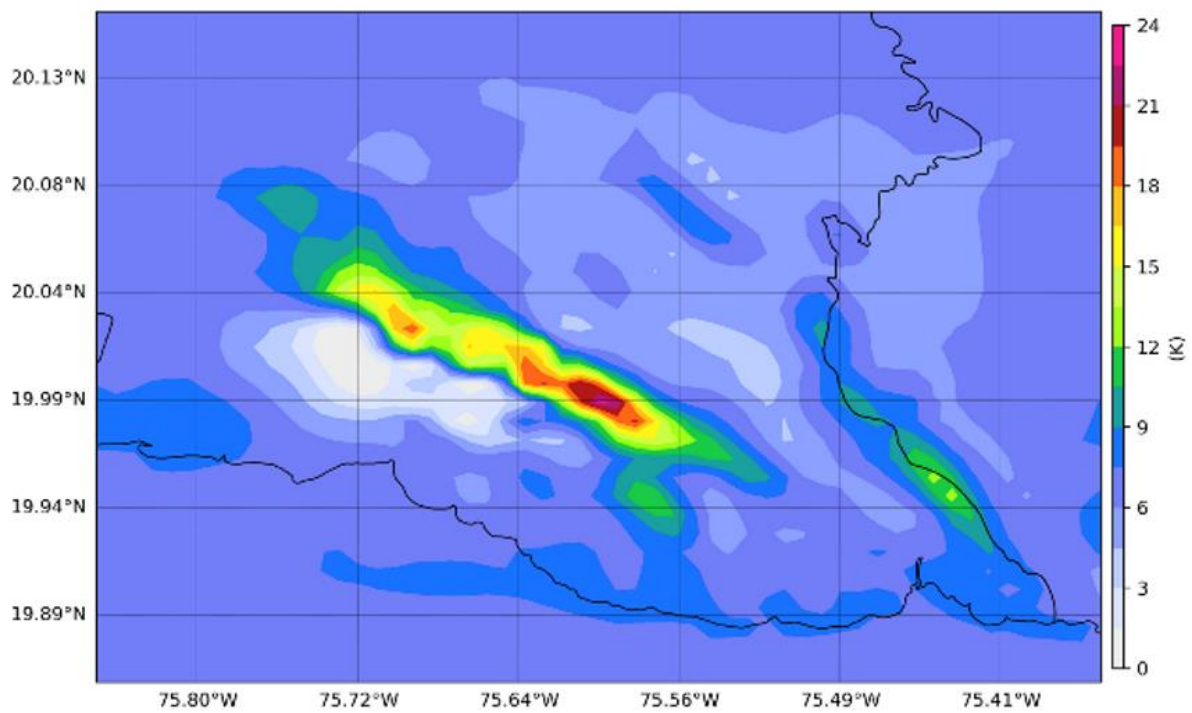


Figura 26. Mapa con valores del Duct Factor

ANEXO 7

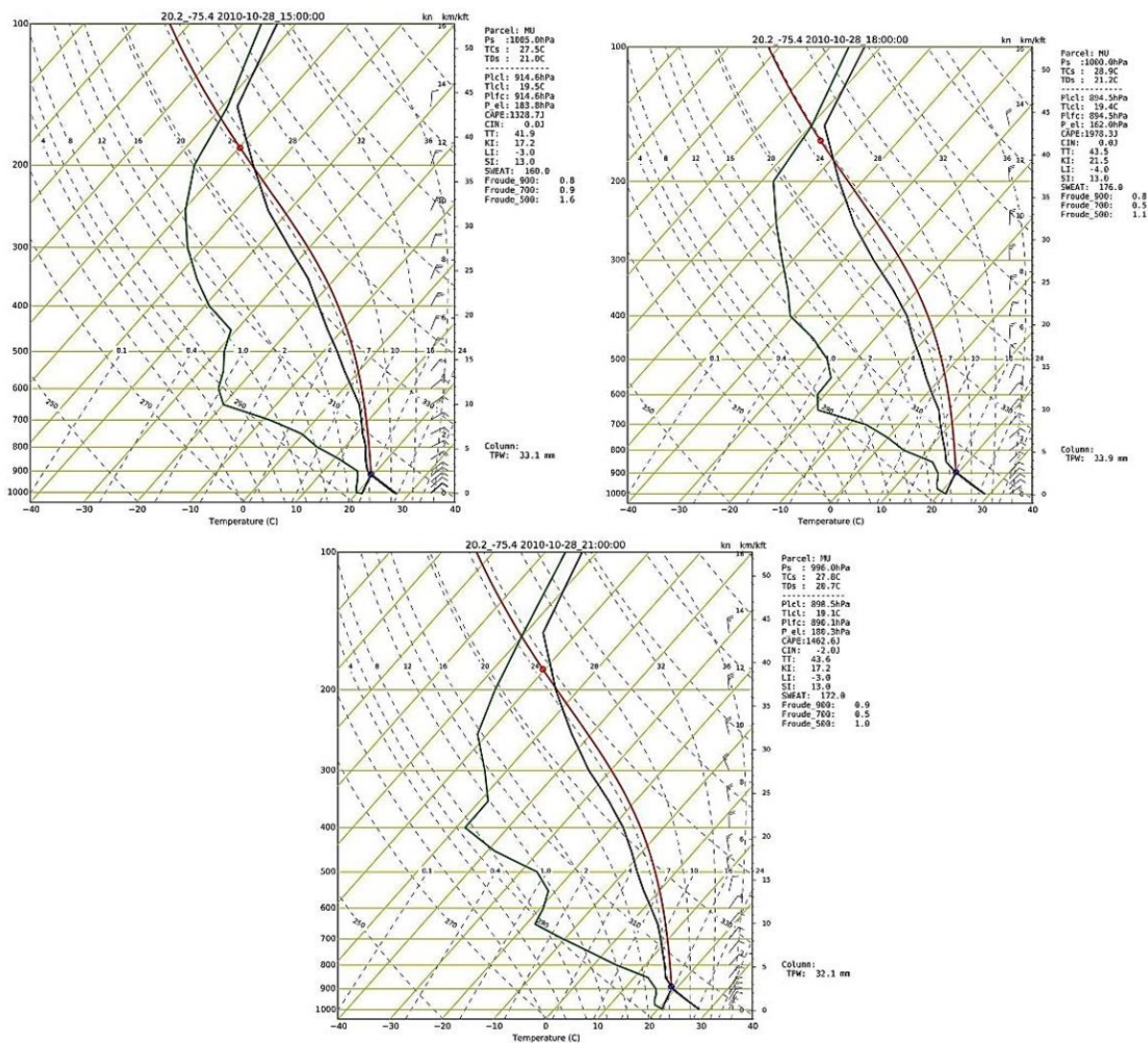


Figura 27. Sondeos interpolados 15, 18, 21 UTC

Celia Margarita Álvarez-Suau. Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, Avenida Finlay km 7 ½, Cuba, teléfono: 261103, celia.suau@cmw.insmet.cu
 Yordan Gallardo-Avilés. Centro Meteorológico Provincial de Camagüey, Avenida Finlay km 7 ½, Cuba, teléfono: 261103, ygaviles@cmw.insmet.cu

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.
 Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)