

ESTUDIO Y SIMULACIÓN DE TORNADOS EN EL ÁREA GEOGRÁFICA DE BARRANQUILLA

STUDY AND SIMULATION OF TORNADOS IN THE GEOGRAPHICAL AREA OF BARRANQUILLA

rev.ciencia.poder.aéreo.7: 32-45, 2012

Autor
Ernesto Díaz¹

Fecha de recepción: 28 de mayo de 2012
Fecha de aceptación: 25 de julio de 2012

Resumen

Entre los fenómenos de tipo convectivo que más han incrementado en Barranquilla están los tornados, los cuales se presentan en áreas geográficas definidas, en especial en el suroccidente de la ciudad; produciendo daños físicos considerables en las estructuras de viviendas y empresas, con la pérdida en ocasiones de vidas humanas. La complejidad del problema y sus múltiples interacciones hacen que la única manera de evaluar estos cambios, sea mediante el uso de modelos computacionales que intentan simular la física del fenómeno climático en estudio; estos tienen una precisión limitada debido al desconocimiento del funcionamiento de la atmósfera.

En esta primera fase de la investigación se busca estudiar el comportamiento de los tornados, en el área metropolitana de Barranquilla, explorando toda la literatura disponible sobre su nivel de ocurrencia en la ciudad, los grados de destrucción que se generan en el área circundante, los datos históricos que registren el comportamiento de las variables físicas que los generan y los distintos modelos computacionales ya existentes susceptibles de ser parametrizados en la geografía local.

Palabras clave: Simulación, tornado, variables físicas, malla computacional.

Abstract

Within the convective phenomena that have been increasing in Barranquilla are the tornados that struck specific geographical areas, especially in the south west of the city, producing considerable physical damages in the structures of dwellings and businesses with sometimes the loss of human lives. The complexity of the problem and its multiple interactions make computational models that try to simulate the physics of the climatic phenomenon the only way to evaluate these changes; however they have a limited precision due to the ignorance of the condition of the atmosphere.

In this first phase of the investigation we focus on the behavior of tornados in the metropolitan area of Barranquilla, exploring all the available literature on its level of occurrence in the city, the kind of damage generated in the surrounding area, the historical data of physical variables that explain their origin and the different computational models of parameters in the local geography.

Key words: Simulation, tornado, physical variables, computational models.

1. Docente Investigador, Unicosta. Magíster en Ciencias Computacionales, ITESM, con estudios de Doctorado en Ingeniería de Software – Universidad de Vigo, España. Artículo derivado de la investigación Simulador de tornados para el Comando Aéreo de Combate No. 3 de la Fuerza Aérea Colombiana, grupo de investigación GIACUC, Convenio Fuerza Aérea – Unicosta. Correos electrónicos: ediaz@cuc.edu.co – ernestodiaz43@hotmail.com



1. Introducción

1.1 Problema

En el siglo XX, la temperatura de la superficie global aumentó cerca de 0,60 grados centígrados, lo que produjo la disminución de las áreas cubiertas de hielo y nieve. En la región de América Latina y el Caribe los efectos de ese proceso dejaron huellas en la modificación de los patrones de precipitación, el derretimiento de los glaciares y la vulnerabilidad de costas, bosques y selvas.

El calentamiento global, que altera la temperatura y los patrones de clima del planeta, es producido por los gases de efecto invernadero derivados principalmente del uso de combustibles fósiles, tales como: carbón, petróleo y gas.

En la zona del Caribe se expresa en el incremento en la intensidad y frecuencia de huracanes. Los tornados en áreas geográficas de Europa y América presentan cambios bruscos de temperaturas y caídas en la presión atmosférica, cambios en los patrones de precipitaciones y aumento de los niveles de ríos en particular en Argentina y Brasil; la reducción de los glaciares en la Patagonia y en la cordillera de los Andes.

En América Latina los efectos más importantes que tiene el efecto del calentamiento global están relacionados con las costas y con los aumentos en el nivel del mar, la modificación de los cursos hídricos, por el cambio en el modelo de precipitaciones y el derretimiento de los glaciares, las modificaciones de las regiones productoras agrícolas, ganaderas y la salud, porque los cambios en el clima van a favorecer el desarrollo de enfermedades como el dengue.

Por su escasez de recursos, Latinoamérica será particularmente vulnerable a los fenómenos meteorológicos extremos desencadenados por el calentamiento global. En los próximos años, prevén los expertos, se multiplicarán los huracanes, tormentas, sequías, olas de calor y tornados.

1.2 Objetivo

La ubicación geográfica de la ciudad de Barranquilla favorece la aparición de estos fenómenos climáticos: la elevada energía térmica, causada por la abundante radiación electromagnética proveniente del sol, la alta proporción de vapor de agua por ser zona costera, los altos niveles de convección (movimientos verticales ascendentes) y evaporación, incidencia de la zona de confluencia intertropical (ZCIT), entre otras, son las principales causas de la aparición de tornados, los cuales necesitan ser estudiados en su comportamiento utilizando modelos computacionales que permitan predecir su aparición y grado de destrucción.

El cambio climático se ha incrementado en el tiempo y es normal que en temporadas de lluvia los habitantes de Barranquilla sean testigos de la ocurrencia de Tornados acompañados de tormentas eléctricas y precipitaciones torrenciales que causan algunos traumatismos en la cotidianidad de la ciudad.

1.3 Método

La complejidad del problema y sus múltiples interacciones hacen que la única manera de evaluar estos cambios sea mediante el uso de modelos computacionales que intentan simular la física del fenómeno climático en estudio, estos tienen una precisión limitada debido al desconocimiento del funcionamiento de la atmósfera.

2. Referentes Teóricos

2.1 Características Generales

Durante los últimos 15 años, aproximadamente, se han hecho presentes, en la ciudad de Barranquilla fenómenos climáticos asociados a las tormentas y otros fenómenos que por su gran capacidad de destrucción y por su amenazante configuración han traído pánico a la población y daños a la infraestructura física de la ciudad y su área metropolitana: los tornados y las trombas. Estos son característicos de latitudes medias, entre la línea imaginaria de los trópicos y los círculos polares de ambos hemisferios, hacen su aparición cada vez con mayor frecuencia en zonas geográficas donde teóricamente no deberían presentarse, ante la mirada perpleja de los incrédulos y la impotencia de muchos entendidos para explicar las razones de su formación. Si aún en zonas templadas los meteorólogos tienen ciertas discrepancias alrededor de su génesis, mucho más acá donde el fenómeno es relativamente nuevo.

Como un aporte para la comprensión de los fenómenos reseñados se dará una explicación de cómo se forman y demás situaciones que acompañan su ocurrencia.

2.2 Tornados y Trombas



Figura 1. Tornado en la ciudad de Barranquilla. Fuente: elheraldo.com.

El tornado es el fenómeno más violento y de mayor capacidad destructiva de los conocidos en el mundo meteorológico. Es un vórtice primario que puede ser definido como una rotación ciclónica en forma de embudo o cono invertido que se extiende desde la base de una nube cumulonimbo (la misma de la cual se producen las tormentas) hasta llegar al suelo. Esta rotación desciende de la base de la nube cuando se desarrolla y retorna a ella al disiparse.

El estado del tiempo que precede a la formación de un tornado es el mismo que precede a la formación de una tormenta, se podría decir que aquel es un derivado de esta, razón por la cual, ocurren cuando conjuntamente o tras su paso se dan fuertes lluvias acompañadas de gran actividad eléctrica.

El color del embudo es generalmente oscuro o negro a causa de la humedad, el polvo y escombros que son levantados por las fuertes corrientes ascendentes que lo caracterizan.

Los tornados generalmente son de corta duración, su diámetro no sobrepasa normalmente los 100 metros y el viento puede alcanzar hasta 400 Km/h (aunque los supertornados estadounidenses han alcanzado más velocidades), lo que es coherente con su capacidad devastadora. La presión atmosférica en su centro es marcadamente inferior a la del aire que lo rodea (la diferencia puede llegar a ser hasta más de 100 hectopascales); razón por la cual, durante su recorrido alrededor de edificaciones que se encuentren cerradas estas explotan en el sentido estricto de la palabra, por la acusada e intempestiva diferencia de presiones entre su interior y el exterior.

El tornado se mueve acorde al movimiento de la nube madre que lo genera, la trayectoria que sigue a menudo es errática. Cuando la rotación no alcanza al suelo, al vórtice se le denomina nube de embudo (funnel cloud) o manga, el nombre de tornado solo lo toma cuando impacta la superficie. Si se da sobre superficie marítima recibe el nombre de tromba marina, ésta por lo general es de menores proporciones que el tornado.

2.3 Tipos de tornados

Según la TORRO (Organización de Investigaciones de Tormentas y Tornados del Reino Unido) existen dos tipos de vórtices primarios o tornados: Los Tornados Supercelulares (ST) y los Tornados No Supercelulares (NST), dependiendo del tipo de formación convectiva de la que se desprende o se generan. Dentro de los tornados no supercelulares se destacan dos tipos: los *Landspouts/Waterspouts* y los *gustnados*.

Los Tornados Supercelulares (ST) son engendrados por tormentas rotatorias o supercélulas. Son a los que mayor poder destructivo se les atribuye, característicos de latitudes medias debido a que su formación solo se da en zonas de marcado contraste entre masas de aire con características térmicas y barométricas diferentes.

A estos se les asocia el mayor número de muertes en los Estados Unidos por causa de tornados, aunque son los menos frecuentes. No se tienen indicios de que un tornado de estas características haya azotado un área ubicada por debajo de los 20° de latitud. Se pueden identificar por el hecho de que la porción de la base del cumulonimbo del cual desciende el vórtice (mesociclón) rota al unísono con este.

Los Tornados No Supercelulares (NST) obedecen a las características de los que se presentan en la ciudad de Barranquilla, son producidos por tormentas que no rotan (no poseen mesociclón). Es el tipo de tornados más comunes y además de presentarse en latitudes medias, también se presentan esporádicamente en zonas tropicales muy localizadas, tal es el caso de esta ciudad.

Los anteriores, tienen una vida mucho más corta que los supercelulares y en comparación son mucho más débiles, aunque en ocasiones suelen llegar a tener una capacidad de destrucción capaz de causar daños a las estructuras y cobrar víctimas humanas (el tristemente recordado tornado del 15 de septiembre de 2006 dio a conocer la gran fuerza destructiva que puede llegar a alcanzar este tipo de tornados).

Son capaces de desarrollarse en diversas circunstancias y pueden adoptar formas diferentes; no son fáciles de detectar por radar, lo que los hace imposible de pronosticar en este entorno, no sólo por las dificultades anexas al fenómeno sino porque se carece de medios tecnológicos para intentarlo.

Dentro de los dos tipos de tornados no supercelulares que existen, los *Landspouts* son los que más se ajustan al modelo *Barranquillero*; sin descartar que sea probable que algunos eventos atribuidos a las ráfagas de vientos, microrreventones o vendavales que se han dado en el pasado en realidad obedezcan a los denominados *Gustnados*.

Acorde con la definición que de ellos hacen la revista RAM de España y la TORRO, los *Landspouts* se forman cuando circulaciones horizontales de aire son embestidas y elevadas hacia arriba por una tormenta en desarrollo. Se observan asociados a cúmulos de gran desarrollo vertical antes de que la precipitación sea visible en el radar (Ver Figura 2).

Son bastante visibles y muchos tienen un embudo estrecho o en forma de cuerda que se prolonga de la base de la nube hasta el suelo. Cuando este se desliza por un extenso cuerpo de agua se le denomina *waterspout*.



Figura 2. Landspout. Fuente: meteored.com. Nelson Vásquez Castellar (2006).
Tornados, se encienden las alarmas.

2.4 Escalas de Tornados

Hacia mediados de la década de los 70 del siglo anterior, fue adoptada como herramienta para medir la intensidad de los tornados la escala elaborada por Tetsuya Fujita y Allan Pearson de la Universidad de Chicago, por parte del National Weather Service de los Estados Unidos.

Tabla 1. Escala Fujita y descripción de daños.

Intensidad	Velocidad del viento	Daños
F0	60-117 km/h (45-72 mph)	Leves
F1	117-181 km/h (73-112 mph)	Moderados. Estos tornados pueden levantar tejas o mover coches en movimiento. Trailers pueden ser tumbados y barcos pueden ser hundidos.
F2	181-250 km/h (113-157 mph)	Considerable. Los tejados de algunas casas pueden ser levantados, los trailers y casas rodantes que estuvieran en el camino del tornado serán demolidos. Este tornado también puede descarrilar vagones de trenes.
F3	250-320 km/h (158-206 mph)	Graves. Árboles pueden ser arrancados de raíz y paredes y tejados de edificios sólidos, serán arrancados con total facilidad.
F4	320-420 km/h (207-260 mph)	Devastadores. Motores de trenes y de camiones de 40 toneladas serán lanzados fácilmente por los aires
F5	420-520 km/h (261-318 mph)	Extremadamente destructivos. Tornados con esta intensidad destruyen todo en su camino. Los coches pueden ser lanzados como si fueran juguetes, y edificios enteros pueden ser levantados del suelo. La energía es similar a la de una bomba atómica. Conocido coloquialmente como el "Dedo de Dios".
F6	520-610 km/h (319-379 mph)	Daño inconcebible. Nunca se ha registrado un tornado de estas magnitudes, hasta el momento.

Fuente. Via RAM

La escala elaborada por Fujita y Pearson se fundamentaba en fusión de otras dos escalas: la escala Beaufort de vientos y la escala Match de velocidad. El método utilizado fue dividir la diferencia entre ambas escalas hasta un punto determinado; Match 1.0 (la velocidad del sonido) y Beaufort 12 (73 mph o Km/h) en 12 categorías o incrementos, de F0 a F12, conocida en nuestros días como la escala Fujita – Pearson o simplemente las escala Fujita (Ver Tabla 1).

En Barranquilla, la gran mayoría de tornados que han hecho presencia se encuentran ubicados entre las categorías cero (F0) y uno (F1), con excepción del ocurrido el 15 de septiembre de 2006, el cual se ubica en la categoría F2. Situación que guarda relación con el tipo de tornados que se han señalado como propios del tipo de formación convectiva característica de la región.

En algunas ocasiones, por apresuramientos o por escepticismo, se ha exagerado en la nominación y caracterización de los fenómenos ocurridos, o por el contrario, se han subestimado los efectos que estos pueden causar en la población.

Urge tomar medidas ante la manifestación de los tornados como fenómenos ya propios de la ciudad y sus alrededores; su frecuente ocurrencia y su inigualable manifestación, así lo comprueban. El mayor conocimiento que se tenga de estos en cuanto a frecuencias, tiempos de duración, lugares de manifestación, mecanismos de formación, condiciones, intensidades y formas, conllevará a un fortalecimiento en la toma de decisiones respecto a la prevención y alertas a la ciudadanía. Además, en el establecimiento de planes de fortalecimiento y reubicación de zonas expuestas a los desastres que estos fenómenos pudieran causar.

Ante las discrepancias en torno a la eficiencia y operatividad de la escala Fujita se creó una nueva escala, llamada escala mejorada de Fujita. Además, existe la escala TORRO que se fundamenta también en la escala Beaufort de viento y que ha sido reconocida desde 1975 por la Sociedad Meteorológica Real. Se deja como información la descripción de ambas escalas para en una futura entrega correlacionarlas entre sí y junto a la escala Fujita tradicional, en aras de sacar nuevas conclusiones alrededor de los tornados que se originan en la ciudad de Barranquilla y su entorno.

2.5 Modelos Computacionales de Pronósticos Mesoescalares

2.5.1 Fundamentos y revisión bibliográfica

Para el estudio de la atmósfera y los fenómenos meteorológicos se usan distintas herramientas. Los sensores de medición de las variables atmosféricas han representado durante siglos la base del estudio del tiempo. Los primeros pluviómetros son ya descritos en 1247 por el matemático chino Ching-Shao, empezándose a usar desde el siglo XIII, por los chinos en Corea, realizando mediciones esporádicas, mientras que se conservan registros eventuales de temperatura y de presión atmosférica desde comienzos del siglo XVII.

Estas herramientas han sido la base para el estudio de la climatología y la meteorología de una región durante siglos. Hasta los años 50 del siglo XX se empieza a desarrollar otro tipo de herramientas que hoy son fundamentales para el conocimiento y predicción de la atmósfera; estas herramientas son los conocidos modelos meteorológicos.

Antes de entrar en la descripción de estos modelos es importante definir qué se entiende por modelo. Hay dos significaciones: modelo físico y modelo matemático. Un modelo físico es una representación a pequeña escala de un fenómeno físico natural. Por ejemplo, la maqueta de una determinada zona geográfica, en un túnel de viento para analizar los campos de vientos, las corrientes generadas, etc. Por otro lado, un modelo matemático es un conjunto de expresiones matemáticas que describen el comportamiento de un determinado sistema físico-químico.

Para resolver las expresiones que definen un modelo matemático se recurre a la modelización numérica, hablándose de modelo numérico cuando se implementan dichas expresiones en un entorno de cálculo computacional que hoy en día implica el uso de un soporte informático. De ahora en adelante, cuando se use la expresión modelo numérico se hará referencia a la implementación informática de las expresiones matemáticas que describen la física de la atmósfera.

Es importante poner de manifiesto la simplificación que se introduce en cada tipo de modelo. A partir de un estudio teórico se desarrollan las expresiones que describen el sistema físico-químico, siendo estas, en medida variable, aproximaciones al propio fenómeno, ya que no siempre se tiene el conocimiento completo del mismo.

La resolución de dichas expresiones conduce usualmente, en casos complejos como es la física de la atmósfera, a realizar aproximaciones al no poder encontrar soluciones analíticas para las ecuaciones que se plantean. Así, al final se tiene una solución aproximada de la situación de estudio. Por eso que se debe tener presente que un modelo propone una aproximación a la realidad, la evaluación de esta aproximación se ha de analizar a posteriori.

2.5.2. Escalas meteorológicas

Los fenómenos que acontecen en la atmósfera tienen dimensiones espaciales y temporales muy dispares superponiéndose usualmente unos con otros. La definición de estas dimensiones es un tema de controversia, que a grandes rasgos es aceptada por los distintos autores implicados en el tema, pero que en el matiz padece de algunas diferencias.

Debido a la naturaleza del trabajo que se quiere realizar, el estudio de los campos de vientos para el área geográfica de Barranquilla, conviene exponer las definiciones planteadas hasta el momento sobre el tema. La siguiente descripción se basa en la revisión bibliográfica realizada por Bonastre (1996).

Macro-escala, meso-escala y micro-escala son las tres divisiones más generales utilizadas por la comunidad científica. Para definir las escalas meteorológicas de un modo objetivo, Charney (1948) propone llamar macro-escala a la de aquellos fenómenos en los que las aceleraciones propias del sistema son de una magnitud despreciable frente a la aceleración de Coriolis.

La micro-escala es aquella donde las aceleraciones del sistema son tan grandes que su magnitud es comparable a la de la aceleración de la gravedad. Los fenómenos de la micro-escala responderán, por tanto, a leyes no-hidrostáticas, lejos del quasi-equilibrio de la macro-escala. La meso-escala es aquella en que las leyes de la hidrostática todavía son válidas y a la vez ha dejado de ser válido el quasi-geostrofismo.

Las aceleraciones propias del sistema no son despreciables frente a la de Coriolis, incluso pueden tener un orden de magnitud semejante, pero son muy inferiores a la aceleración de la gravedad.

Las tres definiciones propuestas por Charney (1948) siguen siendo válidas en la actualidad. Las diferencias entre los distintos autores surgen al matizar en más profundidad cada una de las divisiones y subdivisiones que las componen.

Orlanski (1975) propuso una estandarización de la clasificación de las escalas de los distintos fenómenos atmosféricos, proponiendo ocho subdivisiones espacio-temporales contenidas en las tres grandes escalas, debido al rango de fenómenos que englobaban la clasificación macro-, meso- y micro-. En la Figura 3 se detalla dicha subdivisión.

Define la macro-escala como la escala espacial mayor de 2000 km y temporal del orden de una semana o más, y la micro-escala como la escala espacial de hasta 2 km y temporal del orden de varios minutos. Quedando definida la meso-escala como aquella que encaja entre la macro-escala y la micro-escala. Sin embargo, el propio autor remarca que al no ser posible generalmente identificar la relación entre los parámetros geofísicos y la escala espacial intrínseca a ellos, todas las divisiones espaciales son en alguna medida arbitrarias y poco definidas.

Varios autores han propuesto definiciones distintas, Pielke (1984) define los fenómenos meso-escalares como aquellos que tienen una escala longitudinal, horizontal, suficientemente extensa para ser hidrostáticos, pero suficientemente pequeña para que la fuerza de Coriolis sea pequeña comparada con las fuerzas advectivas y del gradiente de presión. Pielke manifiesta que el límite superior es dependiente de la latitud, pero también el límite inferior será dependiente de la estabilidad de la capa límite planetaria (Thunis y Bornstein, 1996). Esta definición reproduce la escala meso- β de Charney (1948).

Otro autor que define los límites entre escalas es Stull (1988). Considera el límite inferior de la meso-escala en 3 km. Su propuesta es concordante con parte de la de Orlanski (de meso- α a micro- γ), pero con la inclusión de una subdivisión más, micro- δ , abarcando el rango desde 2 m a 2 mm.



Es importante resaltar que en la propuesta de Stull se produce un solapamiento entre escalas, micro- y meso-escala, que se extiende desde la mitad de la meso- γ hasta el límite inferior de la micro- α . En escritos posteriores el propio autor (Stull, 2000) suprime los solapamientos entre escalas y devuelve los límites de la meso-escala a los de Orlanski, aunque mantiene la zona para la micro- δ en la micro-escala.

Los límites verticales de los fenómenos meso-escalares los define Pielke (1984) siendo aquellos que se extienden desde decenas de metros hasta las profundidades de la troposfera. Esto se entiende viendo que fenómenos con poca extensión, como las brisas marinas, están contenidos en la capa fronteriza, mientras que forzamientos mesoescalares profundos, como las tormentas, pueden extenderse muy por encima de esta.

Thunis y Bornstein (1996), en un trabajo reciente, han propuesto una revisión de la clasificación de Orlanski. En la figura 3 se presenta la revisión realizada junto con todas las definidas hasta el momento. Las variaciones propuestas se concretan en tres modificaciones de las subdivisiones de Orlanski:

- Adición de la escala micro- δ .
- Renombramiento de la meso- α a macro- γ .
- Renombramiento de la micro- α a meso- δ .

Estas modificaciones desplazan la meso-escala a una subdivisión hacia abajo a la propuesta por Orlanski (1975), con ello se incorporan las propuestas por Stull (1988), pero sin tener en cuenta el solapamiento de escalas.

Por último, hacer un breve comentario sobre las escalas temporales. La extensión temporal de los fenómenos meteorológicos se considera que mantiene una proporcionalidad con las distintas escalas espaciales (Stull, 2000). Así,:

$$t \approx k \lambda \quad (6.1)$$

Tabla 2. Escalas atmosféricas y fenómenos asociados.

Lg	Lifetime	Stull (1988)	Pielke (1975)	Orlanski (1975)	Present	Atmospheric phenomena
10000 km	1 month	Macro	Sinoptical	Macro- α	Macro- α	General circulation, long waves
3000 km	1 week			Macro- β	Macro- β	Synoptic cyclones
200 km	1 day	Meso	Meso	Meso- α	Macro- γ	Fronts, hurricanes
20 km	1 h			Meso- β	Meso- β	Low-level jets, thunderstorm groups, mountain winds and waves, sea breeze, urban circulations
2 km		Micro	Micro	Meso- γ	Meso- γ	Thunderstorm, clear-air turbulence
200 m	30 min			Micro- α	Meso- δ	Cumulus, tornadoes, katabatic jumps
30 m	1 min			Micro- β	Micro- β	Plumes, wakes, waterspours, dust devils
2 m	1 s			Micro- γ	Micro- γ	Turbulence, sound waves
					Micro- δ	

Fuente: Thunis y Bornstein (1996).

siendo t la escala temporal de duración λ la longitud o dimensión horizontal de la escala de desarrollo del fenómeno k una constante de proporcionalidad. (Ver Tabla 2)

El área de análisis del tema de Investigación que se quiere desarrollar es el área geográfica de Barranquilla. Esta tiene una amplitud de unos 250 km, quedando enmarcada en la escala macro- γ . Por lo tanto, los fenómenos que acontezcan en esta región estarán inmersos en la propia escala macro- γ e inferiores. Los fenómenos que se suceden en estas escalas se pueden ver en la Figura 3.

3. Tipos de Modelos

Gracias al uso de los modelos meteorológicos NWP se ha realizado un avance muy importante en la predicción del tiempo y la descripción de los distintos fenómenos meteorológicos. Debido a las distintas escalas en las que se suceden los movimientos de masas de aire en la atmósfera se han desarrollado distintos tipos de modelos. En la Figura 3 se esquematizan.

GCM	REGION	MESO	CLD-PBL
GCM---ECMWF---NGM---ETA---MASS/MM5---CLOUD			
300km-----100km-----20km-----1km			
Macro---Meso α ---Meso β ---Meso γ ---Micro			
YEARS---WEEKS---DAYS---DAY---HOURS			

Figura 3. Espectro de modelos numéricos meteorológicos
Fuente: Meso (1997).

Se tiene un espectro de modelos según la escala temporal y espacial de los fenómenos a estudiar. Por un lado se tienen los modelos de Circulación General Hidrostática (GCM).

Son modelos que trabajan con baja resolución espacial, 200 km, y estudian fenómenos que tienen períodos de años, se afirman que trabajan en la macro-escala. Se trata de modelos que tienen por prioridad simular el flujo de circulación general atmosférico, y por lo tanto, deben trabajar en una malla de integración que cubra toda la Tierra. Se utilizan, principalmente para realizar predicciones a medio plazo, estacionales y climáticas (García-Moya, 2003). En el otro extremo se sitúan los modelos de elevada resolución conocidos como modelos no-hidrostáticos de nubes. Estos trabajan con resoluciones espaciales de centenares de metros o menos, describiendo fenómenos de horas a minutos de duración; trabajan en la micro-escala.

Los modelos regionales y meso-escalares son los que describen óptimamente fenómenos comprendidos entre la macro-escala y la micro-escala. No hay una clara división entre estos dos tipos, pero se puede considerar que un modelo regional trabaja con resoluciones de 50-150 km y los meso-escalares de 1-50 km.

Los modelos regionales, meso-escalares y modelos de nubes se conocen también con el nombre de modelos de área limitada (Limited Area Model, LAM) al centrarse en regiones específicas y poseer unos límites laterales bien establecidos, a diferencia de los modelos globales (Ver Figura 5).

El interés del presente trabajo de investigación se centra en el estudio de los campos de vientos en el área geográfica de Barranquilla de dimensiones 270 x 260 km², trabajando con resoluciones elevadas, 2 km. Es por eso que se consideran los modelos mesoescalares como los más interesantes para este tipo de estudio. Para lo que sigue, en este apartado se hará referencia únicamente a los NWP meso-escalares.

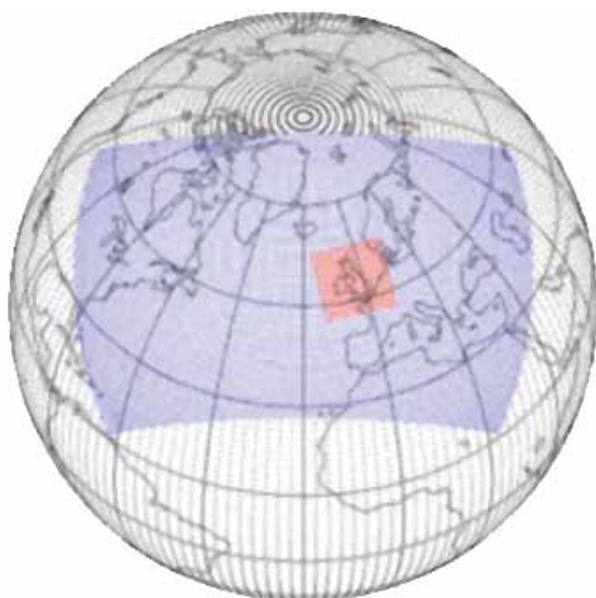


Figura 4. Malla de trabajo de un modelo global (negro), un modelo regional (azul) y un modelo mesoescalar (rojo) Fuentes: García y Moya (2003).

4. Ecuaciones Primitivas

La mayoría de modelos numéricos usan una formulación similar, al resolver las leyes fundamentales de la física atmosférica. Las ecuaciones básicas que rigen el comportamiento de la atmósfera, son las que describen el comportamiento de un fluido newtoniano en un sistema de referencia en rotación, y por lo tanto, los principales fenómenos que se producen en él, como son su movimiento y los intercambios de energía entre distintos puntos del fluido (Calbó, 1993).

Estos modelos son una representación computacional física y dinámica de la atmósfera y de la superficie terrestre. Así, plantean un conjunto de principios de conservación que gobiernan el estado atmosférico, que se detallan a continuación respecto a un sistema de coordenadas cartesianas y con notación tensorial (se usa el convenio de Einstein para la suma: subíndices iguales indican suma respecto de ese índice) (Pielke, 1984; Calbó, 1993):

- Conservación de la masa:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{1}{p} \frac{dp}{dt} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

x_i ($i=1,2,3$) son las tres coordenadas espaciales, t es el tiempo u_i las tres componentes del vector, viento p es la densidad del aire.

- Conservación del momento:

$$\frac{\partial}{\partial t} p u_i + \frac{\partial}{\partial x_j} p u_j u_i = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] + p g_i - 2 p \epsilon_{ijk} \Omega_j u_k \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde:

μ es la viscosidad molecular del aire
 g_i es el vector aceleración de la gravedad (0,0,-g)
 Ω_j es el vector de la velocidad angular de la Tierra
 δ_{ij} es la delta de Kronecher
 ϵ_{ijk} es el tensor de Levi-Civita

- Conservación del energía:

$$\delta c = \delta w_t + \delta u_e = \frac{S_c}{p} dt \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde:

δc es el calor intercambiando en un proceso por unidad de masa de un cierto volumen de aire.
 Swt es el trabajo por unidad de masa ejercido por el volumen de aire en este proceso
 du_e es la variación de energía interna por unidad de masa del volumen de aire durante el proceso
 S_c es el término 0 de fuentes y sumideros de energía por unidad de volumen y tiempo.



• Ecuación de estado:

$$p = pr_a t_v \quad (\text{Ecuación 4})$$

donde:

p es la presión atmosférica

ra es la constante termodinámica del aire

ty es la temperatura virtual del aire

• Conservación del vapor de agua, y del agua líquida y sólida:

$$\frac{\partial}{\partial t} p x + \frac{\partial}{\partial x_i} p u_j x = D_x \frac{\partial^2 p x}{\partial x_j^2} + S_x \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde:

x es la relación de masa de un componente de la atmósfera (vapor de agua, agua líquida, vapor)

D_x es la difusividad molecular de este componente del aire

S_x es el término de fuentes y sumideros adecuados a cada sustancia (cambios fases y precipitación)

La Ecuación 2 resuelve la conservación del momento para las tres componentes del viento. Para simplificar la formulación y el tiempo de cálculo, algunos modelos asumen la hipótesis hidrostática, con lo que se sustituye la ecuación de pronóstico del momento vertical por la ecuación hidrostática (Ecuación 6).

$$\frac{\partial z}{\partial p} = - \frac{R \cdot T}{p \cdot g} \quad (\text{Ecuación 6})$$

La hipótesis hidrostática asume que las aceleraciones verticales del movimiento son despreciables. Obviamente, esta hipótesis no se cumplirá cuando los movimientos verticales y las aceleraciones verticales sean importantes. Esto se produce en terrenos abruptos y complejos o cuando se desarrollan convecciones fuertes. La hipótesis hidrostática es válida para escalas sinópticas y planetarias, y para algunos fenómenos mesoscales. Los modelos que se basan con esta simplificación se denominan hidrostáticos, y los que por el contrario resuelven la Ecuación 6, para los tres componentes del viento explícitamente se denominan modelos no-hidrostáticos.

Así, los modelos no-hidrostáticos se aplican en casos donde se necesita trabajar con elevadas resoluciones horizontales (desde decenas de metros a pocos kilómetros). La mayor complejidad en las ecuaciones planteadas hace que los modelos no-hidrostáticos necesiten unos recursos computacionales superiores a los modelos hidrostáticos, y que se haya tendido hasta hace poco a aplicarlos con una resolución vertical limitada.

4.1. Sistemas de Integración

Las leyes de la física atmosférica se desarrollan en una serie de expresiones matemáticas que son transformadas para implementarlas en un entorno informático. Debido a la incapacidad

de ser integradas analíticamente, la resolución de las mismas se debe hacer a partir de la aplicación de métodos numéricos como son:

- Diferencias finitas.
- Técnicas espectrales.
- Técnicas pseudo-espectrales.
- Elementos finitos.
- Esquemas de interpolación.

De todas estas técnicas, las más utilizadas son las diferencias finitas, elementos finitos y los esquemas de interpolación. Aunque las técnicas espectrales han demostrado ser muy precisas (Fox y Deardorff, 1972), su uso no se ha extendido debido a la complejidad de las expresiones con las que se tienen que trabajar. Las técnicas pseudo-espectrales son una opción viable que, sin embargo, no ha sido utilizada por los desarrolladores de modelos numéricos.

El conjunto de leyes que describen los procesos físicos y dinámicos de la atmósfera, tienen una naturaleza altamente no lineal. Esto se refiere a que hay interacción entre los distintos procesos, haciendo que la evolución de la atmósfera sea sensitiva a las condiciones iniciales, tratándose de un sistema energéticamente disipativo. Estas interacciones entre procesos se pueden ver en la Figura 5, donde se esquematizan los distintos procesos físicos que considera un modelo numérico.

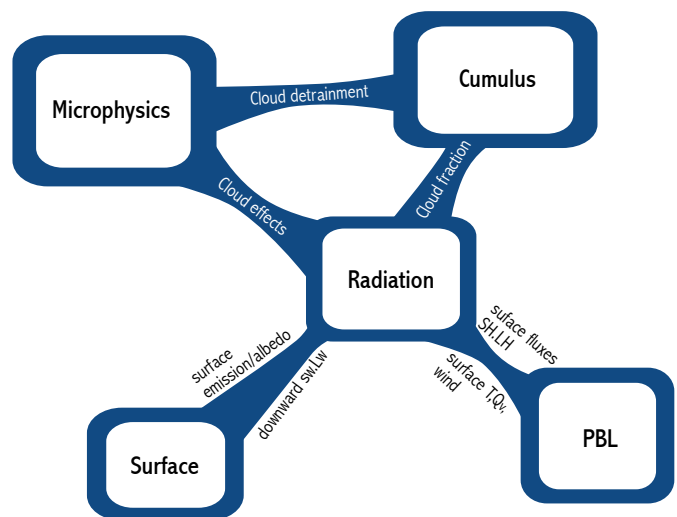


Figura 5. Interacción entre procesos atmosféricos Fuente: MMMD/NCAR (2001).

Este hecho fue constatado por Edward Lorenz (Lorenz, 1963) y forma parte de los conceptos incluidos en la teoría del Caos. El sistema atmosférico por sus propiedades tiene un límite temporal en la predicción de la evolución atmosférica, o sea, que el fenómeno descrito en la predicción sea representativo de la realidad.

Hay varios factores que limitan temporalmente la utilidad de una predicción meteorológica. Algunos de estos son:

- Cobertura y representatividad de los datos observados.

- Tamaño del dominio donde realizar una predicción.
- Sensibilidad específica de la atmósfera a las condiciones iniciales en un instante determinado. Se están realizando varios estudios sobre este último punto.

El estudio de la sensibilidad de la atmósfera a las condiciones iniciales se realiza a partir de las predicciones por conjuntos, conocido como ensemble forecasting. Esta técnica consiste en realizar varios pronósticos de una situación determinada variando ligeramente las condiciones iniciales de la predicción.

Con lo cual se tienen un conjunto de predicciones formando una muestra estadística. Cuando más rápido diverge una predicción del comportamiento mayoritario menor es la probabilidad que la predicción sea representativa.

4.2. Discretización Numérica

Antes de exponer los pasos que sigue un modelo numérico para realizar un pronóstico es interesante comentar cómo se implementa el dominio de estudio en el entorno informático.

Los dominios de trabajos se han de discretizar para que puedan ser utilizados en computación. Un dominio de trabajo consta de la superficie topográfica de interés y la capa de atmósfera a estudiar situada encima de esta.

Así, se genera una malla tridimensional de la zona de estudio, donde el límite inferior es en cada caso la topografía discretizada y los límites laterales son ficticios, impuestos por los límites del dominio de estudio en los laterales, e impuesto por el usuario del modelo en el caso del límite superior.

Una vez definidos los límites se divide en una serie de capas horizontales el espesor de atmósfera a estudiar. La localización de los límites laterales es un punto importante a tener en cuenta. Una buena situación de los límites laterales puede producir una mejora en la simulación sin necesidad de introducir más recursos.

Hay varias técnicas de implementación de esta discretización en un entorno computacional. En algunos modelos se trabaja con coordenadas cartesianas, x,y,z, teniendo que recortar el límite inferior en función de la topografía. En otros casos se opta por el uso de una coordenada vertical distinta, conocida como coordenada σ (denominada también coordenada que sigue el terreno). Lo que se consigue al realizar una transformación de z a σ es un dominio regular en todas las direcciones. En la Figura 6 se esquematizan los dos tipos de coordenadas.

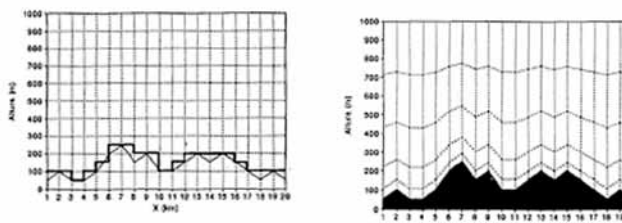


Figura 6. Coordenadas verticales cartesianas y sigma Fuente: Hernández (1995).

A parte, se utilizan distintos métodos para discretizar horizontalmente el dominio. El más usual en los modelos de pronóstico es la malla donde se definen las variables escalares en el centro de la celda y las variables vectoriales en las caras laterales o en los vértices de la misma.

Es decir, si imaginamos una celda cúbica, la temperatura, la humedad específica, la presión se definirán en el centro del cubo, y las componentes horizontales del viento se definirán en los vértices, o en la parte central de las caras laterales del cubo. Por su parte, la componente vertical del viento se define en el centro de las caras superior e inferior de la celda.

La mayoría de modelos trabajan con celdas definidas de esta forma, con variaciones en la localización de las componentes horizontales del viento (Ver Figura 7). Esta configuración se conoce con el nombre de celda escalonada o alternada (*staggered grid*).

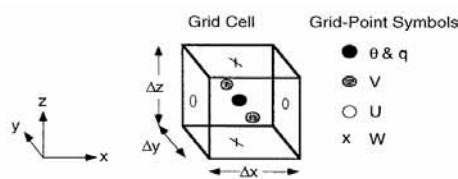


Figura 7. Celda de un NWP Fuente: Stull (2000).

4.3. Procesos de Ejecución

Las fases de ejecución de las que consta un modelo, generalmente tres: un preprocesado de la información inicial, un procesado de los datos, y un postprocesado de los resultados obtenidos (Ver Figura 8).

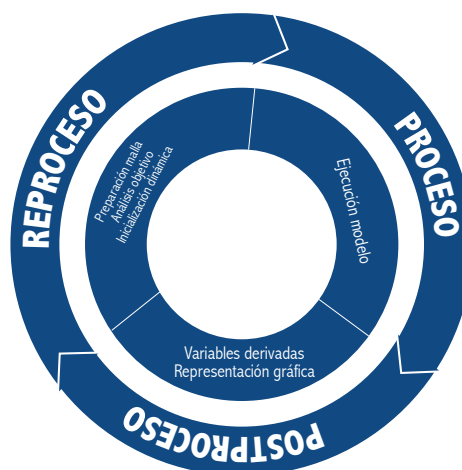


Figura 8. Módulos de un NWP Fuente: Stull (2000).

Así, en el preproceso se realiza la definición del dominio de trabajo, el tamaño del mismo y la resolución de celda que interese en función del tipo de estudio. También se especifican las características del suelo, usos del suelo y distribución de las zonas tierraagua. Una vez realizada la preparación de la malla se procede a la preparación de la información atmosférica disponible.



Se realiza una interpolación de los datos que se tienen dispersos en el dominio de trabajo a la malla regular, introduciendo las medidas de superficie y los perfiles verticales si es el caso.

Por último, se realiza una inicialización dinámica de los datos consistentes en aplicar la conservación de la masa en todo el dominio para asegurar la consistencia dinámica de la información. Al acabar el preprocesado de los datos se dispone de una malla con los datos de presión, velocidad, dirección del viento, temperatura y humedad en cada celda. Esta malla constituye las condiciones iniciales de la simulación.

El siguiente paso es el procesado de la información, consistente en la ejecución del modelo numérico. Para cada celda de la malla se resuelven las ecuaciones que rigen el comportamiento de la atmósfera. La resolución se realiza iterativamente cada cierto tiempo, normalmente un minuto dependiendo de los requerimientos de la simulación.

Por último, a partir de los resultados pronosticados por el modelo, temperatura, humedad, viento y precipitación, se calculan las variables atmosféricas más complejas como pueden ser la divergencia y la vorticidad. Una vez se dispone de toda la información que se desea se procede a la representación gráfica de esta, siendo un punto importante para el estudio y comprensión de los fenómenos que se suceden.

4.4. Parametrizaciones Físicas

Como se ha comentado anteriormente hay distintos modelos para cada escala de estudio, sin embargo, las leyes que gobiernan la atmósfera son las mismas para todas las escalas. Sería lógico pensar que con un solo modelo bastaría para describir todos los fenómenos atmosféricos a escala global, meso-escalar o local, pero esto no es posible debido a la limitación de las herramientas de computación.

Así las cosas, para el estudio de la atmósfera en una escala global, pronósticos de varios años de extensión, es necesario trabajar con resoluciones bajas para poder implementar el modelo en un entorno informático. Análogamente sucede con los modelos meso-escalares, aunque trabajan con resoluciones más finas, hay fenómenos que se suceden en escalas menores al del tamaño de la celda.

Varios procesos físicos críticos para la meteorología regional y de escalas mayores se fundamentan en mecanismos de escala molecular y microscala. La representación explícita de todos estos mecanismos en un modelo mesoscalar supone una tarea poco práctica, por eso se opta por representar los procesos de escalas inferiores a las de trabajo mediante parametrizaciones físicas.

Orientados como sub-modelos dentro del modelo dinámico mesoscalar, estas parametrizaciones representan implícitamente la influencia de la física de sub-escala en la meteorología resuelta explícitamente.

Una parametrización es una aproximación de un término desconocido a partir de uno o más factores conocidos.

En algunos casos, la física del aire no está suficientemente desarrollada para describir ciertos procesos físicos con exactitud, sin embargo, el efecto neto de estos procesos, al poder ser observados, se pueden parametrizar.

Por ejemplo, trabajar con una parametrización sencilla de la precipitación neta, es más aconsejable que desarrollar complejas expresiones que tengan en cuenta la evolución de cada gota que conforma una nube y los cristales de hielo. Las parametrizaciones acostumbran a realizar suposiciones y se basan en relaciones empíricas que permiten evaluar procesos complejos eficientemente a partir de las variables resueltas con las ecuaciones físicas conocidas.

Los procesos físicos que se acostumbran a parametrizar son los flujos superficiales entre suelo-atmósfera, la hidrología del suelo, los flujos dentro la capa fronteriza, la radiación, la física de la humedad explícita, la convección profunda y las nubes de poco desarrollo vertical. La Figura 6 muestra la interacción entre los distintos procesos físicos a parametrizar.

La radiación solar tiene un papel importante en los flujos superficiales de calor y humedad: en altitud con presencia de nubes, desarrollaron una parametrización sencilla que evalúa el balance radiactivo en la superficie terrestre. Este esquema es adecuado para cortos tiempos de integración, pero para períodos más extensos se recomienda usar esquemas más complejos que consideren la interacción con la atmósfera y las nubes.

Respecto al tratamiento del vapor de agua explícitamente, las parametrizaciones varían desde esquemas extremadamente sencillos que solo consideran nubes cálidas y precipitación (Hsie, 1984), hasta sistemas más complejos que incluyen la física de cambio de fase entre agua y hielo (Dudhia, 1989), y sistemas aún más elaborados que trabajan con la física de mezcla de fases, clases adicionales de hielo e interacciones entre los distintos tipos de hidrometeoros. Actualmente, los esquemas más completos son muy similares a los modelos de nubes.

Se han desarrollado varios esquemas de convección para modelos meteorológicos regionales y globales. Para resoluciones gruesas destacan el esquema. En su desarrollo original no incluían movimientos de masas húmedas descendientes. Por su parte, desarrollaron esquemas para resoluciones más finas que incluyen los movimientos descendientes y son más aconsejables para simular el desarrollo de mesoaltas, mesobajas y las tormentas asociadas. Ninguno de estos esquemas está recomendado para aplicarse con resoluciones inferiores a 10 km.

4.5. Anidamiento: Técnicas de Interacción entre Dominios

Otro aspecto a destacar de algunos modelos de pronóstico es la capacidad de realizar anidamientos. Esto es realizar un zoom sobre una región para trabajar en ella con mayor resolución.

Esta técnica se utiliza en los modelos de área limitada (LMA), como son los modelos mesoescalares. Para una buena resolución de la dinámica atmosférica a escala local, como es el caso del estudio a desarrollar, es importante introducir la información sinóptica necesaria.

Debido a las limitaciones computacionales, trabajar con grandes dominios de elevada resolución es hoy en día inviable, por eso se han desarrollado las técnicas de anidamiento que definen dominios menores de mayor resolución dentro de dominios padre. Se resuelve la física de una región con una resolución baja, para describir los fenómenos que se suceden en una escala sinóptica, y a continuación se focaliza la atención en un dominio interior al grande con elevada resolución para estudiar fenómenos de menor escala.

Dos son las técnicas desarrolladas hasta el momento para dicho propósito: interacción de una dirección (*one way nesting*) y interacción de dos direcciones (*two way nesting*).

En la técnica *one way nesting*, interacción de una dirección, se resuelve en primer lugar la física del dominio padre, y la información obtenida se transmite al dominio interior para resolver a continuación la física en este dominio de mayor resolución.

La interacción de dos direcciones difiere de la anterior en que la resolución de la física de los dominios externo e interno se realiza simultáneamente, produciéndose un intercambio de información del dominio padre al dominio interior, y del interior al padre mediante una retroalimentación.

En resumen, el interés y habilidad de un modelo de pronóstico meteorológico radica en la resolución de trabajo, en las parametrizaciones y configuración que use.

Como menor sea la necesidad de parametrizar fenómenos de subescala y más representativas las parametrizaciones a usar, el pronóstico realizado describirá con mayor acierto el comportamiento de la atmósfera.

5. Revisión Bibliográfica de los Principales Modelos Numéricos de Pronóstico Meteorológico de Mesoscala

Se ha realizado una revisión bibliográfica de los NWP mesoescalares más representativos desarrollados hasta el momento. Entre estos se encuentran los aplicados a pronóstico meteorológico y aquellos que presentan un enfoque a estudios de calidad del aire. Los primeros trabajan con resoluciones horizontales de hasta 8-10 km, mientras que los segundos se aplican por debajo de los 5 km, con estudios a 1 km de resolución.

Debido a los objetivos del trabajo, la revisión bibliográfica de modelos se ha centrado en los segundos. Es por eso que no se presentan NWP importantes como pueden ser, por ejemplo,

el modelo de área limitada utilizado por el Instituto Nacional de Meteorología HIRLAM.

5.1. Weather Research and Forecast Model (WRF)

El proyecto *Weather Research and Forecast Model* en desarrollo actualmente, tiene como objetivo el desarrollo de un modelo de pronóstico meteorológico y un sistema de asimilación de datos de nueva generación que permita profundizar y avanzar en el conocimiento y en la predicción de los sistemas de precipitación mesoscalar. Pretende promover a la vez puntos de conexión entre la comunidad científica y los centros de pronóstico operacionales en el ámbito de Estados Unidos.

El WRF está siendo desarrollado por un gran número de centros e instituciones de los EE.UU. como son: NCAR Mesoscale and Microscale Meteorology Division; the National Centers for Environment Prediction (NCEP), the Forecast Systems Laboratory (FSL), the National Severe Storms Laboratory (NSSL), and Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); the Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory (NRL), and High Performance Computing Modernization Office (HPCMO) within the U.S. Department of Defense (DoD); the Federal Aviation Administration (FAA); the University of Oklahoma Center for the Analysis and Predictions of Storms (CAPS); the Environmental Protection Agency Atmospheric Modeling Division; the Atmospheric Sciences Division at the NASA Goddard Space Flight Center; y la comunidad universitaria de investigación.

5.2. 5th Generation Mesoscale Model (MM5)

MM5 es la quinta generación del modelo de mesoescala desarrollado por la *Pennsylvania State University junto con el National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Es un modelo que trabaja en el rango de la escala meso- β a la meso- γ . Resuelve las ecuaciones primitivas de la física de la atmósfera. Puede configurarse como modelo hidrostático o no-hidrostático, trabaja con coordenadas sigma verticales que siguen el terreno, resolviendo las ecuaciones primitivas con diferencias finitas. Posee la capacidad de trabajar con anidamientos, pudiéndose usar dos técnicas distintas, *one way nesting* o *two way nesting*.

MM5: Modelo de pronóstico meteorológico mesoscalar considerado como un modelo que incluye todos los avances realizados hasta el momento en modelización meteorológica (*state of the art model*).

Algunos de los centros que trabajan con MM5 son: Pennsylvania State University, University of California, NASA/MSFC Global Hydrology and Climate Center, Instituto Geofísico del Perú, Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong, Meso Inc., Institut d'Estudis.



Espaciales de Catalunya, Universidad Politécnica de Madrid, Observatorio Nacional de Atenas, Universitat Politècnica de Catalunya.

5.3. Regional Atmospheric Modeling System model (RAMS)

RAMS es el modelo desarrollado en la Colorado *State University*. Modelo meso-escalar que trabaja en el rango meso- α , meso- β , meso- γ . Resuelve las ecuaciones primitivas con diferencias finitas. Puede configurarse como modelo hidrostático o no-hidrostático, usando coordenadas que siguen el terreno en altura. Puede trabajar con anidamientos, empleando *two way nesting*. Centros donde se trabaja con RAMS son: Colorado State University, NOAA Air Resources Laboratory, NOAA Forecast Systems Laboratory, Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo.

5.4 Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS)

COAMPS, *Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System*, es el modelo de mesoescala desarrollado por la Marine Meteorology Division (MMD) de el Naval Research Laboratory (NRL). El modelo incluye un sistema de asimilación de datos atmosféricos formado por un control de calidad de datos, un análisis, inicialización de datos y un modelo atmosférico no-hidrostático, y permite la posibilidad de usar dos modelos oceánicos hidrostáticos. Este modelo está en fase de desarrollo.

COAMPS está siendo utilizado entre otros por: Naval Research Laboratory.

5.5. Advanced Regional Prediction System (ARPS)

ARPS, *Advanced Regional Prediction System*, es un modelo de pronóstico desarrollado por el *Center for Analysis and Prediction of Storms* (CAPS) de la *University of Oklahoma*. Es un modelo que trabaja en el rango de la escala regional a la microescala, orientado al estudio de fenómenos convectivos y tormentas frías.

Modelo no-hidrostático que usa coordenadas que siguen el terreno en altura. ARPS se utiliza en la *University of Oklahoma*, y en Meteo Galicia de la Universidad de Santiago de Compostela.

5.6. Mesoscale Atmospheric Simulation System (MASS)

MASS. Desde su desarrollo ha sufrido importantes mejoras, siendo actualmente un modelo comercializado por la compañía norteamericana MESO, Inc. fundada el 1985. MASS es un modelo mesoescalar que resuelve las ecuaciones primitivas usando la aproximación hidrostática, desarrollado para trabajar con

Capítulo 6: Modelo de pronóstico meteorológico mesoscalar 6-17 resoluciones de 10 a 100 km y 20 a 40 niveles verticales.

Permite trabajar con anidamientos. Recientemente se ha desarrollado la versión no-hidrostática que permite aumentar la resolución de trabajo. Algunos centros que trabajan con MASS son: Meso Inc., North Carolina State University, Saint Louis University, Servei de Meteorologia de Catalunya, Universitat de Barcelona.

5.7. Mesoscale Compressible Community Model (MC2)

El modelo *Mesoscale Compressible Community Model* es un modelo atmosférico basado en los últimos avances en modelización atmosférica.

Se ha desarrollado para aplicaciones meteorológicas de escala muy fina. Se trata de una extensión del modelo de área limitada compresible desarrollado por Tanguay et al, a mediados de los 80 en la Université du Québec à Montreal (UQAM).

La implementación numérica del modelo se basa en un procedimiento sofisticado de pasos de tiempo semi-lagrangianos y semi-implícitos, que permite trabajar con tiempos de integración relativamente elevados a la vez que se resuelven ondas de sonido de rápida propagación, resuelve las ecuaciones primitivas compresibles no-hidrostáticas. Permite trabajar con anidamientos con técnicas de interacción de una dirección. Es un modelo preparado para simular eventos meteorológicos de escalas de ciclones hasta tornados y turbulencia de plumas. MC2 se utiliza en Environment Canada y varias universidades de Canadá.

5.8 Mesoscale no-Hydrostatic Atmospheric Simulation System (Meso-NH)

El modelo Meso-NH es el resultado de la colaboración entre el Centre National de Recherches Météorologiques (Météo-France) y el Laboratoire d'Aérodynamique (CNRS). Se trata de NWP desarrollado con los últimos avances en modelización atmosférica capaz de simular fenómenos meteorológicos de escalas comprendidas entre la meso- α hasta la microescala.

Resuelve las ecuaciones primitivas anelásticas. Permite simular simultáneamente fenómenos de distintas escalas de movimiento con la técnica *interactive grid-nesting technique*. Está preparado para interactuar con un módulo químico acoplado al modelo, aunque no está diseñado para realizar aplicaciones operacionales en calidad del aire. Meso-NH es un modelo ideado como herramienta de investigación para los procesos micro y mesoscalares.

Meso-NH se utiliza en Météo-France, CNRS, varios centros científicos de Francia, Universitat de les Illes Balears, Centre Epon Meteo, Instituto de Astronomía de México.

5.9. Mesoscale Model (MEMO)

El modelo MEMO fue desarrollado por el grupo de investigación del Instituto de Termodinámica Técnica de la Universidad de Karlsruhe. Resuelve las ecuaciones primitivas efectuando la aproximación de Boussinesq. Resuelve las ecuaciones compresibles no-hidrostáticas. La ecuación de continuidad se resuelve con la aproximación anelástica, mientras que la componente del viento del Modelo de pronóstico meteorológico mesoscalar se resuelve mediante una ecuación elíptica para la presión. Trabaja con coordenadas que siguen el terreno y con una discretización alternada para simplificar la discretización de las ecuaciones.

Ante la gran cantidad de modelos desarrollados, es difícil optar por uno u otro. Sin embargo, estudios comparativos indican que la clave para simular satisfactoriamente un fenómeno reside en la configuración específica y opciones usadas del modelo. Así, el trabajar con un modelo específico no es un factor clave, sino el escoger una buena parametrización y configuración.

5.10 Modelo Meteorológico Mesoscalar a utilizar: ARPS

El modelo ARPS es un sistema de modelización y predicción atmosférica completo, que incluye análisis de datos en tiempo real, sistema de asimilación, modelo de predicción hacia adelante y un paquete de post-análisis.

El ARPS se desarrolló inicialmente en el Centro de Análisis y Predicción de Tormentas (CAPS) de la Universidad de Oklahoma, con el apoyo de la Fundación Nacional de Ciencias Centro de Ciencia y Tecnología (CCT) del programa. CAPS continúa trabajando para mejorar y apoyar el uso de ARPS.

La meta original era que ARPS sirviera como un prototipo de sistema para la predicción de tormentas de escala numérica del tiempo. El desarrollo de tal sistema fue también la primera misión de CAPS. ARPS también es adecuado para una amplia gama de estudios ideales del clima. La versión 4.0 de ARPS fue lanzada oficialmente al público en 1995. Desde entonces, mejoras significativas se han añadido y se han diseñado versiones posteriores, tales como la ARPS 4.5.2 última versión en Fortran 77.

Conclusiones

Existen planes para la prevención y atención de desastres que ayudan a mitigar los daños causados por fenómenos climáticos, tales como huracanes y tornados, todas estas medidas más que preventivas son de carácter correctivo y no son efectivas para evitar las pérdidas de vidas humanas y daños en la infraestructura de las ciudades.

En la ciudad de Barranquilla se han incrementado con el cambio climático la ocurrencia de tornados que han dejado grandes pérdidas económicas, la ocurrencia de estos tornados es impredecible y ante ellos la comunidad ha estado expuesta por la carencia de herramientas que permitan predecir con tiempo los cambios en el clima que favorecen su formación.

Las políticas de prevención son casi inexistentes y las entidades de gobierno en parte atienden los daños causados a las personas o simplemente brillan por su ausencia, en esta investigación se ha elaborado un marco teórico tendiente a estudiar el fenómeno climático de los tornados, las leyes físicas que los rigen y la existencia de modelos computacionales que puedan ser utilizados en la simulación y predicción temprana de su ocurrencia en la ciudad de Barranquilla.

Como modelo computacional para el estudio de tornados se propone el modelo de predicción ARPS, teniendo presente que es de distribución gratuita y brinda la posibilidad de ser parametrizado en la geografía local.

El modelo ARPS se utilizaría en la segunda fase de esta investigación para el diseño e implementación de una estación meteorológica en tiempo real que permitiría detectar en forma inmediata la formación de tornados en las zonas geográficas críticas de la ciudad.

Se recomienda en esa fase el uso de computación en paralelo de alto rendimiento (Grid Computing) para poder manejar el volumen de datos que se van a procesar, los cuales requieren alta velocidad de proceso y espacio suficiente en memoria.



Referencias

- Aguirre de Carcer, I. Jaque F. (2001). *Introducción a la Meteorología Ambiental*. Cantoblanco, Madrid: Ediciones de la Universidad Autónoma de Madrid.
- Augusto, T. Wehrle, A. (2003). Tornados y trombas. Centenario de la muerte de Arcimís. *Revista del Aficionado a la Meteorología – RAM*.
- Ayuso, J. J. (1994). Predicción Estadística Operativa en el INM, Vol. B-34 *Monografías del Instituto Nacional de Meteorología*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.
- Capel Molina, J. J. (2002). Tormentas y tornados en la península ibérica. Meteoros adversos extremos que le caracterizan. *Nimbus*, 9(10), pp. 5 -16.
- Center for Analysis and Prediction of Storms. University of Oklahoma. Recuperado de <http://www.caps.ou.edu/ARPS/>
- Cuadrat J. M. y Pita M. F. (2006). *Climatología*. Madrid: Editorial Cátedra.
- Haas, R., T. Ambrizzi, A. J. Pereira F. (2000). Comparação de desempenho entre um cluster PC-linux e um SP2 em simulações com o modelo ARPS. *I Encontro Brasileiro de Modelagem Atmosférica*, XI CBMET, Rio de Janeiro.
- IDEAM (2005). *Atlas climatológico de Colombia*. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia.
- Jacobson M.Z., (1999). *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Patz, J.A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T. y Foley, J.A. (2005). Impact of regional climate change on human health, *Nature*, 438, pp. 310-317
- Rey, E. (2007) *La nueva escala mejorada de Fujita*, aka CumulusHumilis, Equipo SSW. Recuperado de <http://www.tiemposevero.es/ver-reportaje.php?id=146>
- Vásquez Castellar, N. (20 de septiembre de 2006). *Tornados, se encienden las alarmas*. Recuperado de <http://elobservadorm.blogspot.com/search?q=tornado>
- Xue, M.; Droegemaier, K. K.; Wong, V.; Shapiro, A.; Brewster, K. (1995) *Advanced Regional Prediction System Users Guide*, p. 380. University of Oklahoma.
- Xue M., K. Droegemeier and V. Wong, (2000). The Advanced Regional Prediction System (ARPS). *A Multi-Scale Nonhydrostatic Atmospheric Simulation and Prediction Model*. Part I: Model Dynamics and Verification. *Meteorology Atmospheric Physics*. 75, pp. 161-193.

