

## Anexo I

### Abreviaturas, tablas y acrónimos

ACE	Accumulated Cyclone Energy (Energía de Ciclón Acumulada)
AVN	Modelo de predicción numérica americano (AViation model)
BAMS	Bulletin of American Meteorological Society
CAPE	Convective Available Potential Energy
CE	Ciclón extratropical o borrasca de latitudes medias
CEH	Ciclón extratropical con vientos huracanados
CEPPM	Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio
CISK	Inestabilidad condicional de segunda clase
CMT	Centro Meteorológico Territorial
CNH	Centro Nacional de Huracanes de Florida-EEUU (NHC en inglés)
CRR	Convective Rainfall Rain
CT	Ciclón Tropical
DANA	Depresión Aislada en Niveles Altos (cut-off en inglés)
DT	Depresión de la Tropopausa
EFI	Extrem Forecast Index
EPS	Ensemble Prediction System
ERA40	ECMWF Re Analysis, reanálisis del CEPPM
GPV	Grupo de Predicción y Vigilancia
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model
HRVIS	High Resolution VISible
INM	Instituto Nacional de Meteorología
IR	Infrarrojo
KI	Índice K
LI	Lifted Index
m.p.g.	Metros geopotenciales
MET8/MSG1	Primer satélite de la serie MSG
MM5	Modelo de Mesoescala de PSU/NCAR
MSG	Meteosat Second Generation
NCA	Nivel de Condensación por Ascenso
NCC	Nivel de Condensación Convectivo
NOAA	National Oceanic & Atmospheric Administration
NT	Nota Técnica
OB	Origen Baroclino
PNM	Presión a nivel del mar
PPI	Plan Position Indicador
PW	Precipitable Water, agua precipitable
RDP	Región de Desarrollo Principal
RE	Reintensificación
SAFNWC	Satellite Application Facility of Nowcasting
SEC	Strong Extratropical Cyclone
s.n.m.	sobre el nivel del mar
TE	Transición Extratropical
TS	Tormenta Subtropical
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TSM/SST	Temperatura Superficial Marina/Sea Surface Temperature
TT	Transición Tropical
UVP	Unidades de VP
VAD	Velocity Azimuth Display
VDI	Vientos de Desplazamiento en Imágenes
VIS	Visible
VIS0.6	Imagen VIS de longitud de onda centrada en los 0,6 $\mu\text{m}$
VP	Vorticidad Potencial (PV, Potential Vorticity, en inglés)
WEC	Weak Extratropical Cyclone, ciclón extratropical débil
WISHE	Wind-Induced Surface Heat Exchange
WRF	Weather Research and Forecasting Model
WV	Water Vapor

### Conversión de unidades de velocidad

Velocidad				
	km h <sup>-1</sup>	mph	kt	ms <sup>-1</sup>
km h <sup>-1</sup>	1	1.61	1.85	3.6
mph		1	1.15	2.24
kt			1	1.95

Tabla A.1.1 Factores de conversión de unidades de velocidad: kt, nudo; kmh<sup>-1</sup>, kilómetros por hora, y ms<sup>-1</sup>, metros por segundo.

### Realce aplicado a algunas imágenes infrarrojas en el texto según su temperatura de brillo, Tb

COLOR	INTERVALO DE TEMPERATURAS
	-32°C >= T > -36°C
marrón claro	-36°C >= T > -40°C
amarillo	-40°C >= T > -44°C
verde	-44°C >= T > -48°C
cían	-48°C >= T > -52°C
	-52°C >= T > -56°C
	-56°C >= T > -60°C
blanco	-60°C >= T > -64°C
gris	-64°C >= T > -68°C
	-68°C >= T > -72°C

Tabla A.1.2

### Sobre la escala Saffir-Simpson (y colores utilizados para las trayectorias de ciclones tropicales en el Capítulo VI)

Tipo	Categoría	Presión (hPa)	Vientos (kt)	Vientos (mph)	Altura de la marea de tempestad (ft)	Color de la línea
Depresión	TD	-----	< 34	< 39		Verde
Tormenta Tropical	TS	-----	34-63	39-73		Amarillo
Huracán	1	> 980	64-82	74-95	4-5	Rojo
Huracán	2	965-980	83-95	96-110	6-8	Rojo claro
Huracán	3	945-965	96-112	111-130	9-12	Magenta
Huracán	4	920-945	113-135	131-155	13-18	Magenta claro
Huracán	5	< 920	>135	>155	>18	Blanco

Tabla A.1.3 Tipos, categorías y características de los ciclones tropicales.

## Anexo II

### Meteorología tropical y subtropical

#### Sobre los conceptos de ciclón y tipos

Estas definiciones han sido tomadas del Glosario del CNH y están referidas al hemisferio norte.

**Ciclón.** Es un sistema atmosférico con una circulación cerrada donde los vientos y el flujo aéreo giran en sentido contrario a las agujas del reloj.

**Ciclón tropical.** Es un ciclón de núcleo cálido y bandas nubosas no frontales de escala sinóptica que se origina en aguas tropicales o subtropicales, con convección profunda organizada y una circulación cerrada de vientos en superficie alrededor de un centro bien definido. Una vez formado el ciclón se mantiene extrayendo la energía del océano cálido subyacente y de los procesos de liberación de calor que se realizan en los procesos convectivos en su seno. Estos procesos son los que le difiere de los ciclones extratropicales que obtienen su energía del contraste térmico horizontal en la atmósfera (efectos baroclinos o baroclínicos).

**Ciclón extratropical.** Es, por el contrario, un sistema sinóptico de núcleo frío con bandas frontales características. En latitudes medias se le conoce también con el nombre de borrasca extratropical.

El CNH utiliza el término **extratropical** como indicativo de que un ciclón tropical ha perdido sus características fundamentales. Este término implica un desplazamiento hacia el polo y la conversión de la fuente principal de energía primaria del ciclón desde la liberación del calor latente de condensación a los procesos baroclinos (contraste térmico entre masas de aire fría y cálida). Es importante hacer notar que los ciclones tropicales pueden llegar a ser ciclones extratropicales y todavía mantener en su seno vientos de fuerza huracanadas

**Ciclón subtropical.** Sistema de bajas presiones no frontal que tiene características de ciclón tropical y extratropical.

Obsérvese que estas definiciones no obedecen a conceptos geográficos sino a conceptos dinámicos y térmicos, que son los que realmente definen a los diferentes tipos de ciclones. Es posible que en ciertas zonas de la tierra se den los procesos físicos que favorezcan a unos y a otros, además de existir transiciones de un tipo a otro.

#### Sobre transiciones tropicales y extratropicales

##### a.- Transiciones tropicales, TT

Aprovechando el estudio de Delta se puede comentar brevemente el problema de las TT: un proceso por el cual un ciclón no tropical se transforma en otro tropical. Estas situaciones han recibido un especial interés en estos últimos años.

En las zonas subtropicales, digamos entre 25° y 35 ° norte para fijar ideas, se pueden generar y desarrollar ciclones denominados "subtropicales", híbridos y extratropicales. Su origen va asociado, a veces, a vaguadas en altura o a una DANAs (Depresiones Aisladas en Niveles Altos) de latitudes altas que se dirigen y se descuelgan hacia el sur sobre aguas más cálidas. La diferencia entre la temperatura en niveles medios-altos y la del agua del mar son uno de los ingrediente favorables para generar y mantener convección en su seno con un viento crítico, sin que la temperatura del agua del mar tenga que llegar a los 26-27°C de las zonas tropicales (MOIP, 2002).

La generación de un ciclón germen no tropical puede deberse a dos procesos no excluyentes y que, posiblemente, se puedan dar los dos a la vez:

- **Desarrollo de abajo a arriba.** Una baja/seno frío de eje vertical genera convección que es más abundante en el centro de la perturbación. La liberación de calor latente refuerza la baja en superficie, generando un incipiente núcleo cálido en capas bajas.
- **Desarrollo de arriba a bajo.** Una baja/vaguada en 500 hPa se sitúa sobre una baja incipiente en superficie o frente frío, e induce mayor convergencia en capas bajas favoreciendo, posteriormente, el desarrollo de la convección y un núcleo cálido del sistema.

El radio de influencia de vientos fuertes de este ciclón subtropical es mayor que el asociado a una tormenta tropical pura y equivalente que tiende, en su posible transformación, a concentrar los vientos fuertes alrededor de su centro y a intensificarlos.

Los procesos de transformación han sido llamados genéricamente Transiciones Tropicales (TT), en contraposición de las Transiciones Extratropicales (TE). Se puede ver un buen resumen del problema TT en Davis y Bosart (2004, DB04 desde ahora).

DB04 afirman que la mitad de los ciclones tropicales en la cuenca atlántica durante el periodo 2000-2003 tuvieron un precursor extratropical, baroclino en su origen que se les consideran como sistemas de núcleos fríos. Estos sistemas son capaces de crear las condiciones dinámicas y térmicas para generar una "metamorfosis" en los precursores donde la convección aparece de forma, inicialmente, asimétrica para ir tomando una apariencia eje-asimétrica y, en última instancia, llegar a ser un sistema tropical de núcleo cálido simétrico. Los huracanes, así generados, no suelen pasar de categoría 2.

Básicamente, y siguiendo a DB04, las TT son un caso del un espectro más amplio de ciclogénesis marina, en que los flujos autoinducidos por el sistema son preponderantes. Mediante procesos internos diabáticos, la escasa o moderada cizalladura vertical inicial, factor negativo para el desarrollo de los ciclones tropicales, es erosionada y parcialmente eliminada. La convección genera zonas divergentes en niveles altos y va desarrollando una anomalía positiva de tipo térmico en la toda la troposfera, que a su vez va ganando simetría, reflejándose también en el campo de viento y precipitación.

DB04 clasifican las TT en dos tipos: las SEC (Strong Extratropical Cyclone) y WEC (Weak Extratropical Cyclone). Las SEC suelen llevar una vaguada pronunciada en la alta troposfera al oeste de la baja en superficie antes de que ocurra la TT; además en la baja troposfera, la temperatura presenta anomalías cálidas y frías. Para las SEC la distribución mesoesalar de precipitación suele ser asimétrica con una tendencia a generar estructura frontal arqueada o doblada hacia atrás ("*bent back*"), con el campo de precipitación situado al oeste e incluso al suroeste de la baja

extratropical de superficie. Esta estructura suele presentarse un día antes de que se desarrolle definitivamente el ciclón tropical. La "metamorfosis interna" ya está teniendo lugar cuando se observa este tipo de estructuras.

### b.- Transiciones extratropicales

En contraposición a la TT, está la transición extratropical, TE: proceso por el cual un ciclón tropical, CT, pierde sus características para pasar a otro de tipo extratropical.

Durante la TE, el ciclón tropical, que es un sistema de bajas presiones que deriva su energía principalmente de la evaporación del mar en presencia de vientos fuertes y de la condensación asociada con las nubes convectivas concentradas cerca de su centro (mecanismo WISHE), evoluciona a un sistema típico de las latitudes medias de rápida translación (sistemas de baja presión asociados con frentes fríos, cálidos y ocluidos), que obtiene su energía principalmente de los gradientes de temperatura horizontal existentes en la atmósfera. Estructuralmente, los CT tienen sus vientos más fuertes cerca de la superficie de la tierra (una consecuencia de tener un "centro o núcleo cálido" en la troposfera), mientras que los sistemas de latitudes medias tienen sus vientos más fuertes cerca de la tropopausa, a nivel del chorro. El ciclón extratropical resultante extiende las condiciones similares a las del CT a un área más amplia y a latitudes que normalmente están a salvo de dichas perturbaciones.

Cuando el CNH descataloga un CT al pasar a CE hay una tendencia en subestimar los posibles efectos de los restos del ciclón tropical a su paso a entornos más baroclínicos. Realmente puede no ocurrir así, ya que los efectos adversos pueden seguir siendo significativos si el sistema, sobre todo, se reactiva a su paso a extratropical. Algunos centros de predicción de ámbito nacional suelen utilizar el prefijo ex o post (e.j. Canadá los nombra como ciclón post tropical), para remarcar el origen tropical de las perturbaciones descatalogadas por el CNH. Por otra parte, la transición a una perturbación extratropical puede acarrear potencialmente riesgos adversos en las zonas por donde puede pasar.

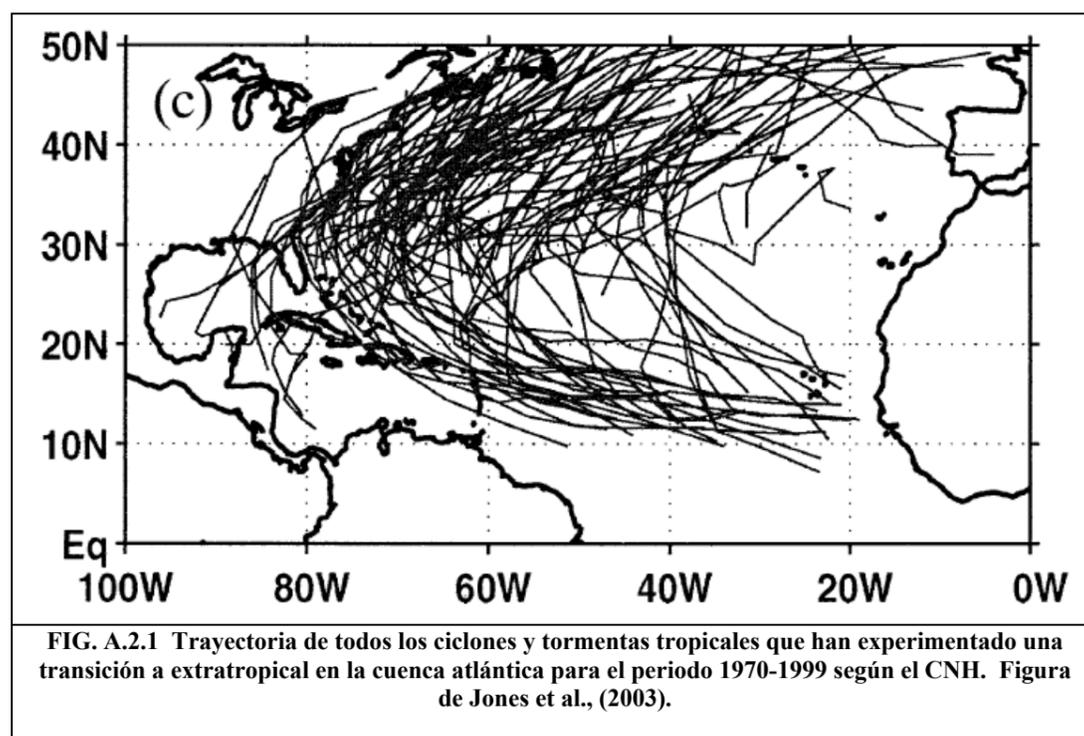
La TE, y su reintensificación como una tormenta extratropical, suele ir asociada con una metamorfosis muy profunda cuando el sistema es captado o absorbido por los flujos de los oestes de latitudes medias de forma adecuada. La perturbación tropical, que se desplaza muy lentamente, se acelera rápidamente, pierde sus características simétricas en cuanto a nubosidad, el campo de precipitación y viento se desacoplan, las zonas de máximos de viento y precipitación, ocasionalmente, se pueden reintensificar desarrollando características de ciclón extratropical activo, pudiendo producir intensas lluvias, altas olas en el mar y vientos que pueden llegar a ser huracanados. Estas TEs han sido ampliamente estudiadas en zonas donde se producen con cierta frecuencia (EEUU, Canadá, Japón, China, Australia, por citar sólo algunos ejemplos). En dicho proceso, las zonas afectadas pueden llegar a ser más amplias que las inicialmente asociadas al propio ciclón tropical

Los modelos numéricos operativos de predicción del tiempo no suelen reproducir con todo el lujo de detalle los procesos complejos que se llevan a cabo en estas transiciones. De esta forma, los predictores se enfrentan a un reto más, tanto más, cuando menos familiarizado estén con estas transiciones adversas en su zona de vigilancia y predicción.

Debido a lo inusual del caso, se analizarán brevemente algunos datos climatológicos de las TE en la cuenca del Atlántico norte, así como las características básicas de dichas TE.

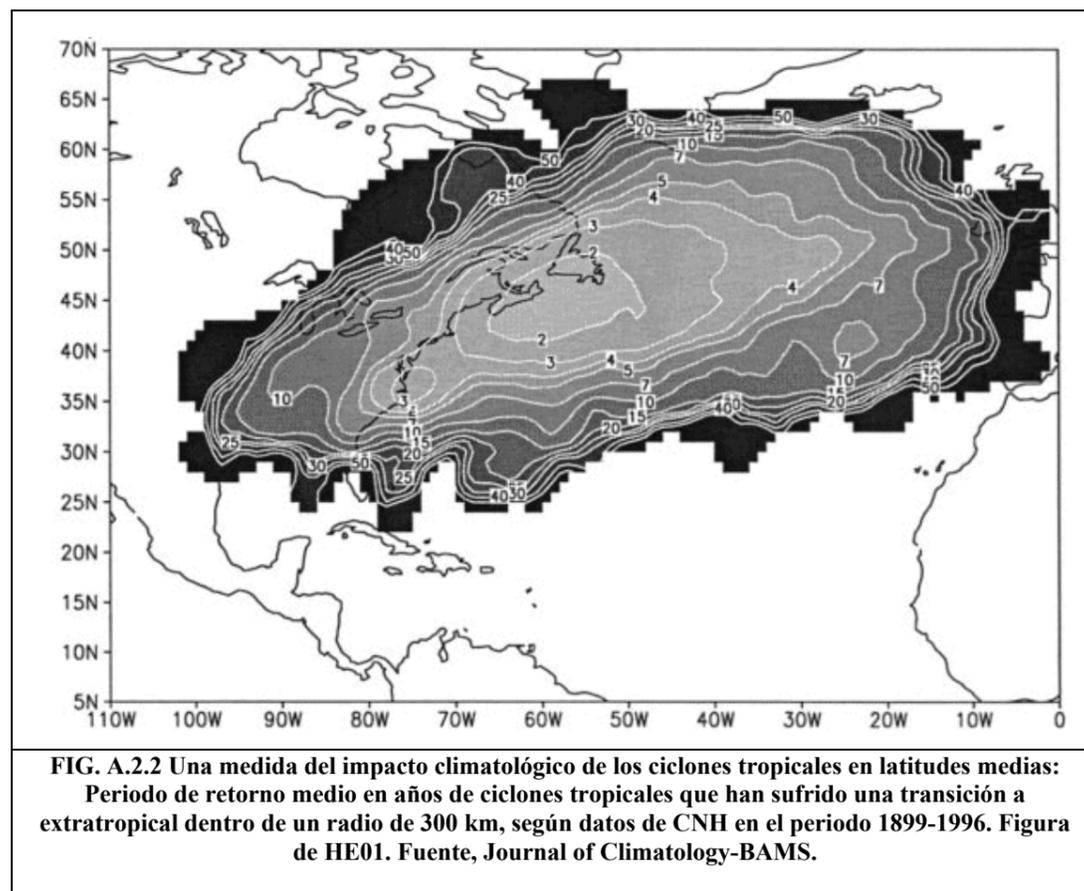
#### b.1 Climatologías de las TE

Una climatología de las transiciones de las tormentas, ciclones, huracanes y tifones tropicales a extratropicales se puede ver en Jones et al., (2003). En la cuenca del Atlántico Norte se observa que la mayoría ocurren sobre el mar, figura A2.1. Las zonas terrestres más expuestas a este tipo de transiciones descansan en la costa este de EEUU y Canadá, islas del Caribe, Azores y Cabo Verde. Esporádicamente algunas de estas transiciones llegan a Europa occidental.



De acuerdo con Jones et al., (2003), el 45 % de los ciclones tropicales en el Atlántico han experimentado una TE en este período de treinta años. Muchas de estas transiciones ocurren en la costa este de EEUU y Canadá, según Hart y Evans (2001), desde ahora HE01, una o dos por año. Algunas tormentas tropicales en su transición a extratropical pueden llegar a las costas europeas: una cada uno o dos años, según HE01. La mayoría mueren en el Atlántico norte sin afectar a tierra firme. De todas las transiciones extratropicales sólo entre el 20-30% sufren, además, una profundización intensa en latitudes medias (Hart et al, 2006). El resto se debilitan y mueren después de la TE.

Llama la atención el mínimo de TE existente entre el golfo de Cádiz, Madeira y zonas marítimas limítrofes a Canarias, tanto por el sur como por el oeste, ver figura A2.2. Este hecho no significa que estas islas o zonas peninsulares no hayan experimentado situaciones adversas de vientos intensos en capas bajas por restos de perturbaciones tropicales y polares. En su justo contexto, lo que se desea hacer notar es que "oficialmente" no se han dado o no se tiene constancia de TE, donde el elemento que se transformaba eran los restos de una tormenta o ciclón tropical de corta o larga trayectoria. Se tendrá que revisar estos patrones de comportamiento con los casos del Delta, Vince y otros de los que se sospecha ciertas similitudes con el primero, como la situación de vientos intensos y generalizados acaecida en Canarias entre los días 13-15 de diciembre de 1975.



HE01 muestran que en el Atlántico Norte las TE ocurren en bajas latitudes al comienzo y al final de la estación de huracanes y en latitudes más altas durante el pico de la estación, septiembre-octubre. Los máximos se dan en estos meses. En ellos la distancia que un ciclón tropical debe recorrer desde las zonas que favorecen su desarrollo hasta la zona que soporta y conduce el desarrollo extratropical es menor que en otros meses del año. En el lado contrario, en julio y agosto, los ciclones tropicales quedan lejos de la zona baroclina activa de latitudes medias siendo menor el número de dichas transiciones.

Las transiciones atlánticas ocurren preferentemente entre los 24° y 55° N, con un máximo entre 35° y 45°. El ciclo estacional de la localización de las transiciones está marcado por dos factores. Por un lado, en la inercia del calentamiento-enfriamiento de las aguas del Atlántico Norte y, por otro lado, en los desarrollos baroclinos que suelen ser más intensos a finales de la estación de huracanes. No es de extrañar que en los meses más frescos de finales de año, la inercia térmica del agua del mar junto con las irrupciones de ondas baroclinas en latitudes más bajas pueda generar transiciones en la zona subtropical del Atlántico Norte.

El ciclo de vida completo de un ciclón tropical que experimenta una transición a extratropical puede ser más complejo que el de un sistema tropical propiamente dicho. A las fases de desarrollo, intensificación y decaimiento tropical hay que añadir otras más cuando se transforma en extratropical con frentes asociados, a saber, transición extratropical y, en determinadas condiciones, intensificación y oclusión como sistema extratropical.

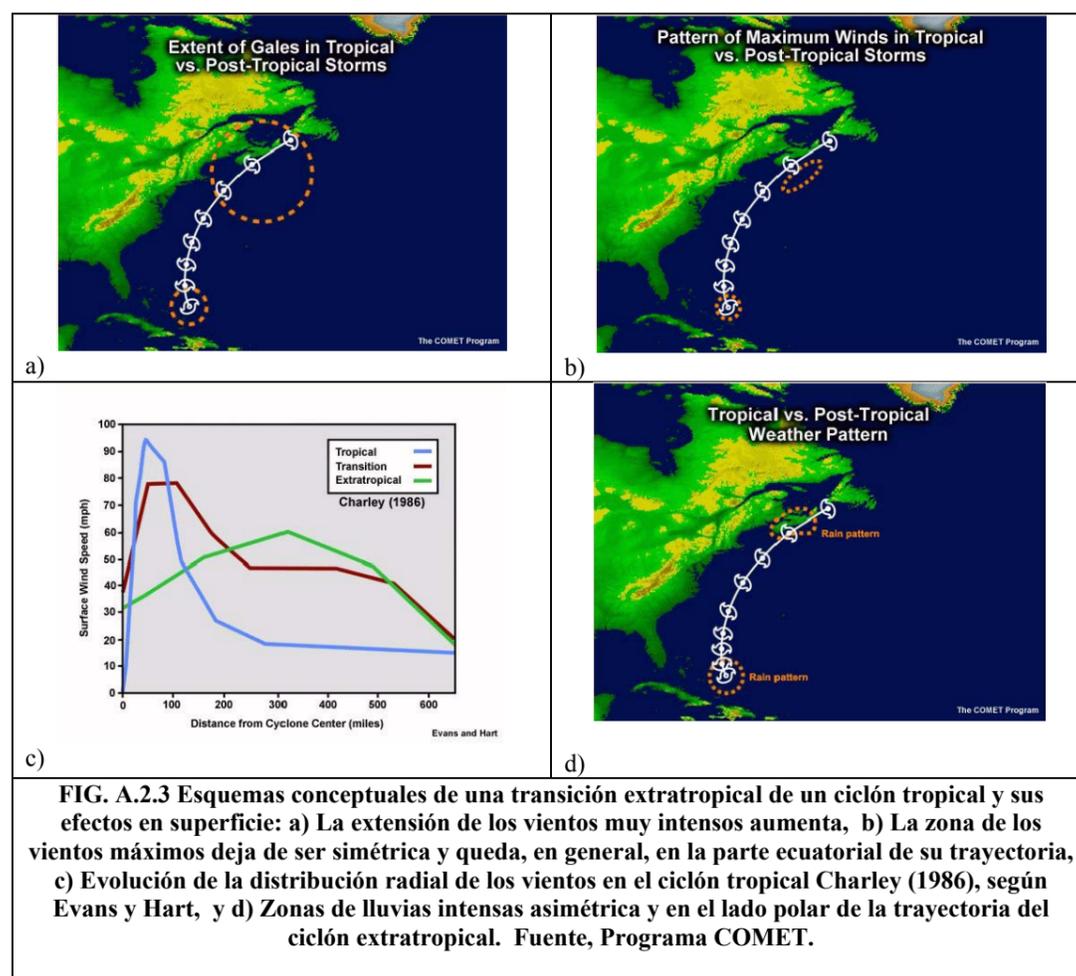
### ***b.2 Características básicas de las transiciones extratropicales***

Los cambios que experimentan un ciclón tropical dependen del entorno medioambiental donde se desarrolle. Estos cambios, su decaimiento o rejuvenecimiento tienen lugar cuando la perturbación tropical se desplaza hacia latitudes más altas, encontrándose con aguas superficiales más frescas, entornos con mayor cizalladura vertical y baroclinidad, ambientes típicos de latitudes medias. Estos factores son los que condicionan su paulatina evolución y se reflejan en cambios en la distribución y tipo de nubosidad, precipitación, viento y estructura térmica, tanto en niveles bajos como altos. Incluso en el desplazamiento del sistema, que en origen es relativamente lento, se modifica, pasando a tener desplazamientos muy llamativos de la misma forma que lo hacen las borrascas extratropicales. En la tabla adjunta, tabla A2.1, se describen algunas de las diferencias entre las perturbaciones ciclónicas tropicales y de latitudes medias o extratropicales. Entre ambos extremos del espectro pueden existir una variedad de ciclones, preferentemente marítimos, que pueden sufrir modificaciones y cambios que se pueden asimilar a algunos de los descritos en dicha tabla.

Ciclón tropical	Ciclón extratropical
Estructura nubosa eje-simétrica compacta: convección, preferentemente en bandas espirales	Estructura nubosa asimétrica: frentes
En muchas ocasiones aparece un ojo bien definido con bandas convectivas alrededor de él. Ausencia de inclinación en la vertical	Bandas baroclinas con características frontales y centro de circulación en capas bajas inclinado respecto a los de niveles altos
Viento muy intenso alrededor del ojo o centro de presión en capas bajas.	Viento muy intenso en niveles altos de la troposfera y cercano a la tropopausa, viento intenso en capas bajas afectando a zonas amplias
Desplazamiento lento	Desplazamiento rápido
Grandes olas alrededor del centro y cerca del ojo	Grandes olas y en áreas más extensas alejadas del centro
Circulación simétrica divergente en niveles altos	Circulación asimétrica en niveles altos
Ausencia de intrusiones frías y secas en niveles medios-bajos	Intrusión de aire frío y seco en niveles medios-bajos
<b>Tabla A.2.1 Principales diferencias entre un ciclón tropical y extratropical.</b>	

### b.3 La dinámica básica de la transición extratropical

No existe una definición exacta de cuándo comienza una TE. Desde el punto de vista operativo distintos centros de predicción y vigilancia en el mundo utilizan diferentes criterios para analizar si una tormenta tropical está o no sufriendo un proceso TE. Para ello se analizan las imágenes y datos de satélites, observando si existe o no una pérdida de la simetría nubosa, decrecimiento de la convección profunda alrededor del ojo o centro del ciclón, aumento de la asimetría y la aparición de un centro de rotación ciclónico en capas bajas con una irrupción de aire fresco y seco en su vertiente occidental, para evolucionar después a sistemas con bandas nubosas frontales o en forma de coma. Este aumento de la asimetría se manifiesta también en los datos de viento: el radio de la zona de influencia de los vientos intensos de fuerza vendaval ( $17 \text{ ms}^{-1}/ 33 \text{ m s}^{-1}$ ) y huracanados (mayores que  $34 \text{ ms}^{-1}$ ) se incrementa en capas bajas, siendo mucho más amplia el área de influencia de dichos vientos que la del ciclón tropical originario. Las zonas de precipitación y viento se desacoplan entre ellas. Ver figura A.2.3.



Los ejemplos conceptuales de la figura A.2.3 no dejan de ser ideales y genéricos y hay que tomarlos como tales. En las situaciones reales la casuística es muy amplia y variada. Lo más significativo es la pérdida de simetría de los campos de precipitación y vientos en capas bajas, así como las transformaciones que ocurren en las estructuras nubosas del sistema asociado.

EH01 apuntan que la TE comienza como resultado de examinar dos la evolución de elementos importantes: la temperatura del agua del mar sobre la que se desplaza el ciclón y la evolución de la simetría nubosa proporcionada por las imágenes de satélite. La estimación del mínimo de presión al nivel del mar es muy usada para el análisis y diagnóstico de la intensidad del ciclón, antes, durante y después de la transición.

Uno de los modelos conceptuales más conocidos sobre las TE es el desarrollado por Klein et al., (2000) basado en estudios comparativos en el Pacífico Norte Occidental. En el estudio se distinguen dos etapas en la TE:

- Etapa de transformación: Paso de un vórtice de núcleo cálido a un ciclón extratropical (CE) baroclino.
- Etapa de reintensificación extratropical, si fuera el caso.

En el modelo conceptual de la etapa de transformación distinguen tres fases que se muestran esquemáticamente en la figura siguiente.

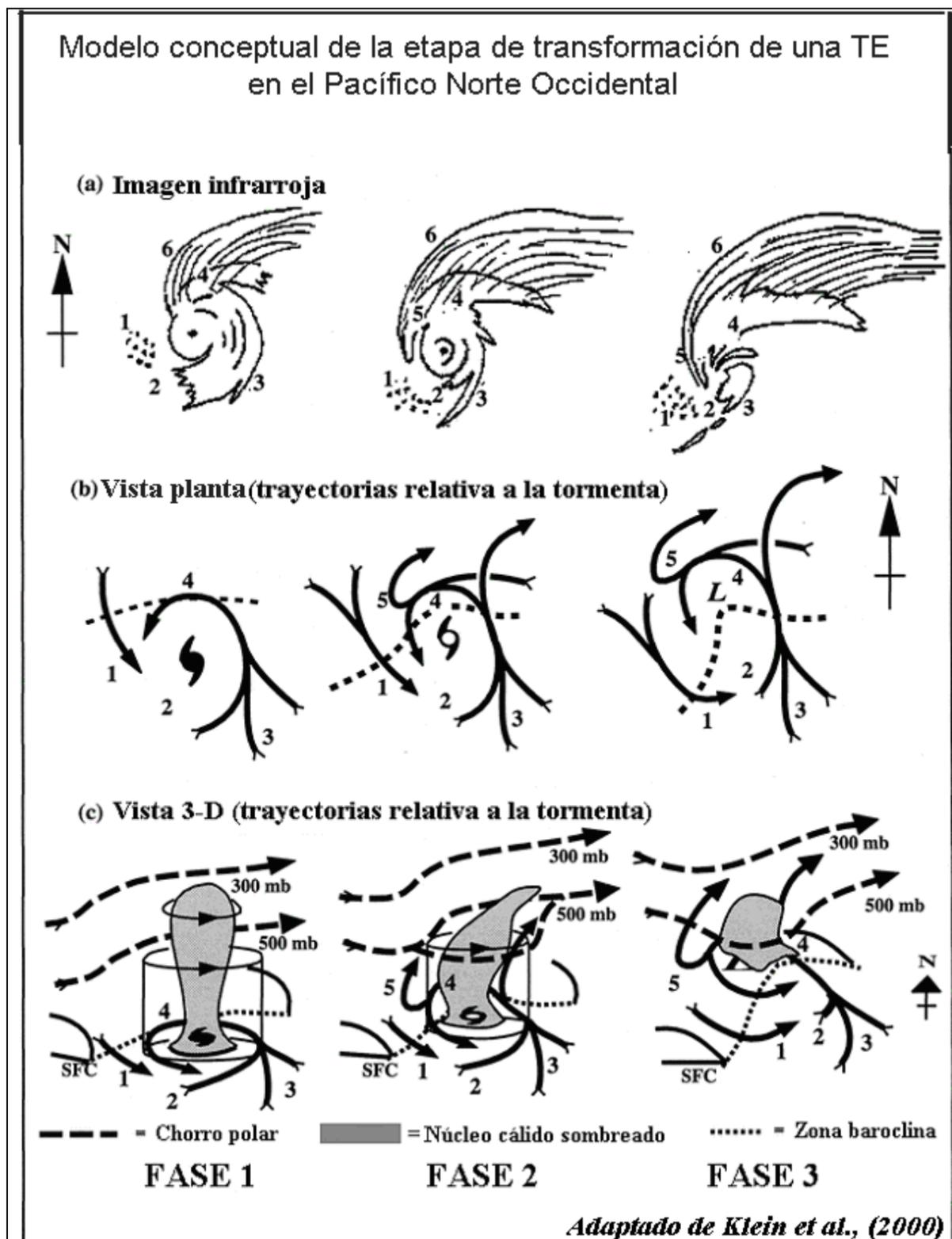


FIG. A.2.4 Modelo conceptual para las TEs en el Pacífico Norte Occidental. Figura adaptada de Klein et al., (2000). (1) Flujo circundante de aire más frío y seco de componente norte, con cúmulos y células abiertas en el flanco suroeste. (2) La convección del ciclón tropical erosionada en el cuadrante occidental (presencia de *dry slot*) en la fase 1, que se extiende por el cuadrante sur en las fases 2 y 3. (3) Flujo circundante hacia el polo de aire cálido y húmedo que se inyecta en la circulación del ciclón tropical, mantiene la convección en el cuadrante oriental con el resultado de una asimétrica distribución nubosa y de precipitación en las fases 1 y 2; en las fases 2 y 3 se observa la presencia de un chorro del sur que asciende por las superficies isentrópicas inclinadas. (4) Ascenso de aire cálido y húmedo por encima de las superficies inclinadas isentrópicas asociadas a la zona baroclina (línea a trazos). (5) Ascenso (cortado por descenso adiabático seco) que produce bandas de nubes que se enroscan hacia el oeste y el ecuador alrededor del centro del ciclón; el descenso adiabático seco se produce lo suficientemente próximo al centro de la circulación para producir una erosión de la convección de la pared del ojo en la fase 3. (6) Escudo de cirros con un borde nítido si confluye con el chorro polar y que se expande con el tiempo según el flujo en niveles medios-altos hacia el este.

## FASE 1

En la Fase 1 (a), el ciclón tropical comienza la etapa de transición mientras que se traslada hacia latitudes más altas y se encuentra con temperaturas de agua del mar, SST, más frescas (mapa no mostrado). Su circulación externa comienza a interactuar con una zona baroclínica preexistente de latitudes medias. Cuando la interacción con la zona baroclínica comienza, un flujo ambiental más frío y seco en su lado ecuatorial (marcado como 1 en la figura A.2.4) penetra por el oeste del ciclón tropical. Así, se observa escasa convección profunda, que es evidente en la circulación externa en el cuadrante occidental del ciclón. A la vez, una "ranura" o "mordedura" seca (*dry slot*) se observa en el cuadrante sudoeste (marcado como 2 en figura A.2.4), con la disminución de la convección profunda y pérdida inicial de la simetría nubosa. El flujo en el lado este del ciclón tropical (3) advecta aire cálido y húmedo en los cuadrantes meridionales y este del ciclón, que mantiene la convección profunda en dichas zonas. De esta forma, un indicador inicial de la transición es su aspecto asimétrico respecto a los patrones tropicales de las

nubes donde reina la simetría, similar al observado en las imágenes de satélite. En este ambiente, el flujo del lado polar gira ciclónicamente e interactúa con una zona baroclina preexistente (etiquetada como 4) para producir un ascenso sobre las superficies isentrópicas inclinadas. Puesto que la tormenta tropical también está comenzando a interactuar en un entorno con más cizalladura vertical del viento y asociado al chorro polar, un escudo de cirros (6 en la figura) que se observa en las imágenes IR, se irá elongando y estirando con el tiempo.

## FASE 2

En la siguiente fase, 2, el ciclón tropical sigue situado en el lado ecuatorial de la zona baroclina. La interacción entre la zona baroclina y el ciclón hace que más aire fresco y seco entre por su lado occidental de éste, a la vez que aire más cálido y húmedo se inyecte por su parte oriental del sistema (flujos etiquetados como 1 y 3, respectivamente). Este hecho produce un dipolo de advección de temperatura en la baja troposfera: fría y seca al oeste y cálida y húmeda al este. La extensión de la ranura seca (etiquetada 2) en el cuadrante meridional aumenta y erosiona la nubosidad del ciclón.

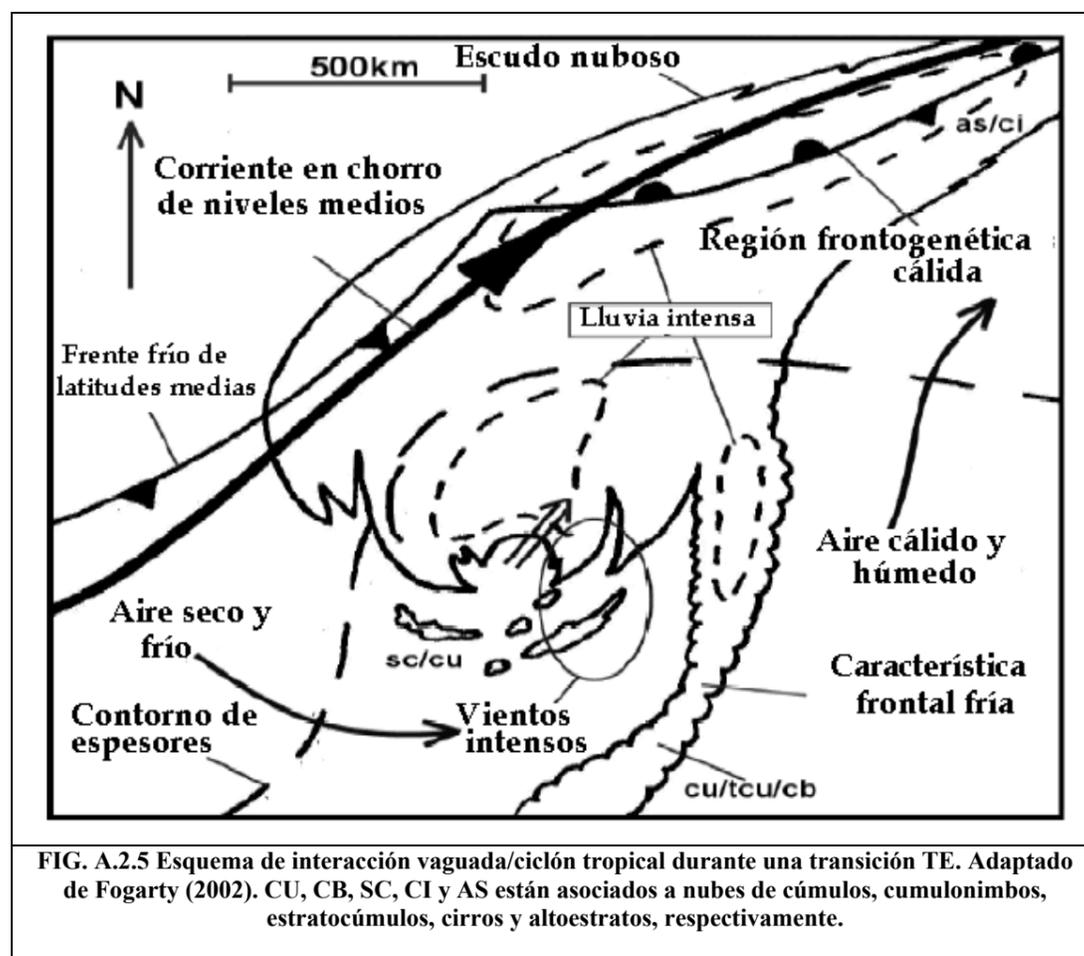
El flujo ambiental de aire cálido y húmedo al este de la tormenta avanza hacia la zona baroclínica y asciende sobre las superficies isentrópicas inclinadas de la tormenta (zona etiquetada como 4). Algunas de estas masas de aire ascendentes dan la vuelta ciclónicamente y después descienden en el cuadrante occidental. El descenso (adibático seco presumiblemente) al oeste del centro de la tormenta se ve compensando por los ascensos del este. Al mismo tiempo, otras masas de aire continúan sus ascensos en la troposfera media y dan la vuelta anticiclónicamente al noreste (5). Finalmente, las bandas estrechas de convección pueden extenderse hacia el cuadrante suroeste desde el cuadrante norte a un punto al oeste del centro de la tormenta, que está generalmente en una región más fresca, más seca y que inhibe la convección profunda.

Durante esta fase, la tormenta se ve más afectada por la cizalladura vertical del viento de la zona baroclina, y un escudo de cirros con un borde muy nítido (etiquetado con 6) aparece como una zona difluente en la parte delantera de niveles altos de la tormenta tropical que llega a ser confluyente con el jet polar. Aunque los vientos del oeste en 500 hPa se acercan y giran alrededor de la zona cálida en niveles medios que se va debilitando. La convección persiste en el núcleo interno del ciclón tropical.

## FASE 3

La fase 3 es la conclusión lógica de la continuación de los procesos físicos descritos en el paso 2. El centro del ciclón se encaja en la zona baroclínica, la cizalladura vertical del viento aumenta, los valores de SST bajo la tormenta disminuyen, la advección fría (cálida) producida desde el oeste (este) debido al flujo ambiental y la interacción de la circulación tropical del ciclón con la zona baroclina se acentúa, se generan ascensos más acusados sobre las superficies isentrópicas inclinadas al norte y descensos (adibático seco) al noroeste y al oeste. Aunque la cizalladura vertical creciente del viento se cree que es la responsable de la advección continuada corriente abajo de los restos del núcleo cálido de la troposfera superior, sigue habiendo un núcleo cálido débil en la troposfera baja en el centro superficial de la depresión (zona sombreada, en el panel derecho inferior). Mientras tanto, el descenso adiabático –seco al oeste del centro de la tormenta de la masa de aire que ha ascendido previamente en la zona baroclina debilita progresivamente la convección de origen tropical del núcleo interno del ciclón, produciendo la eventual erosión del muro nuboso alrededor del ojo en los cuadrantes occidental y meridional.

El ciclón tropical, ya transformado, ahora se asemeja más a un ciclón extratropical donde una gran zona de nubes multicapas se ha desarrollado que se asemeja a un frente cálido, con una banda más débil de nubes al sureste que se asemeja a un frente frío, ver figura A.2.5 de Fogarty (2002).



El aire fresco y seco asociado al frente frío de latitudes medias penetra por el cuadrante suroeste creando las zonas típicas del "dry slot" o hendidura seca. Los vientos más intensos se asocian al aire seco y más fresco que a la vez se suma a la traslación de la tormenta.

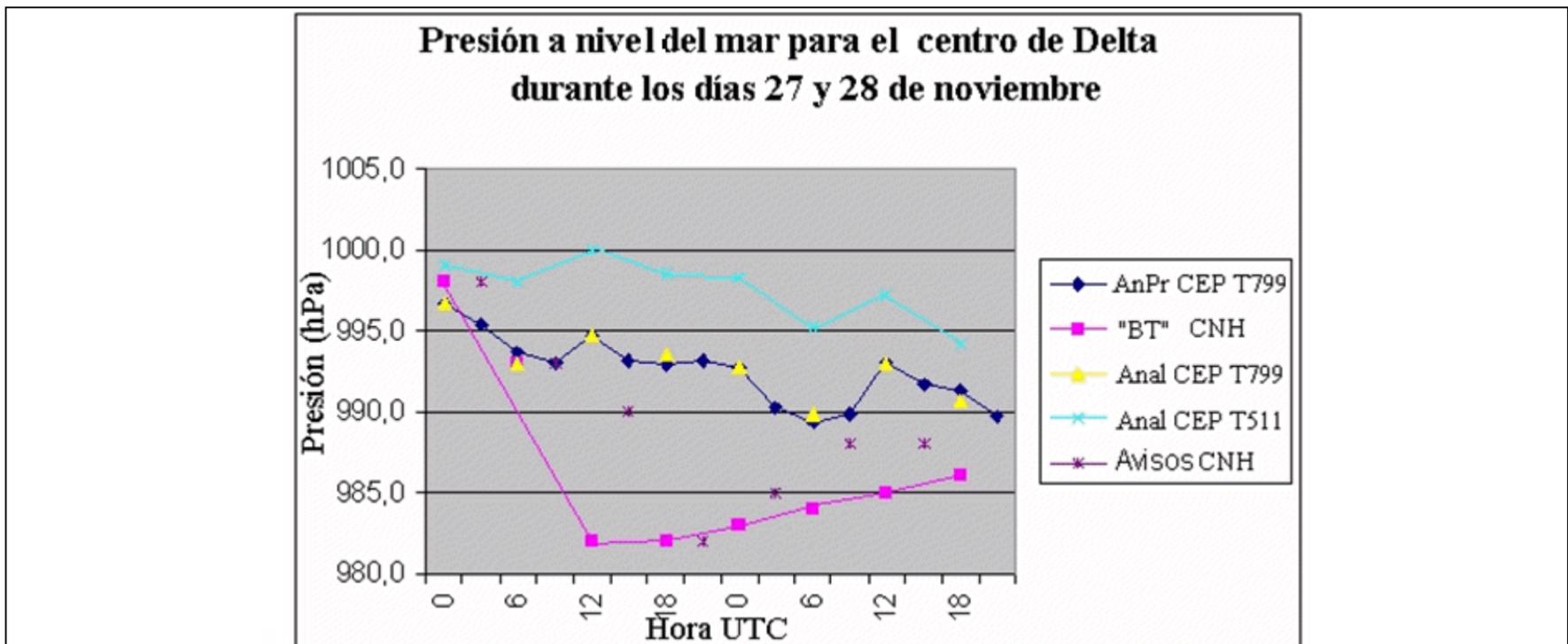
La interacción positiva entre los restos de un ciclón tropical y vaguada baroclina se pueden resumir en los siguientes puntos críticos:

- **Nubes.** Pérdida de la simetría nubosa y difluencia de niveles altos en el cuadrante noreste, el sistema se elonga con el flujo de niveles medios-altos, se desarrollan estructuras parecidas a frentes, la convección disminuye en la zona sur y se desacopla del centro del ciclón, el ojo del sistema, si existiera, queda visible con nubes bajas sobrevoladas por aire más seco y tendiendo a desaparecer con el tiempo.
- **Vientos** Los vientos intensos y huracanados que se encontraban alrededor del ojo o centro de la perturbación se van debilitando pero en la TE la zona afectada en bajos niveles aumenta.
- **Desplazamiento del sistema.** Se acelera.
- **Lluvia.** Las lluvias más intensas quedan en la parte izquierda de la trayectoria de la baja y en las zonas de nubosidad frontal. A nivel mesoescalar estas lluvias se pueden ver intensificadas por efectos locales, preferentemente de origen orográfico.
- **Temperatura.** La llegada del ciclón produce una subida de temperaturas seguida de una bajada por el aire más fresco trasero, salvo efectos locales.
- **Estado del mar.** Las olas ganan altura sobre todo en la parte derecha de la trayectoria de la tormenta.

Todos estos elementos pueden ser modulados por las características particulares de cada ciclón, su transición y la orografía de la zona afectada.

### Anexo III

#### Sobre la presión mínima de Delta durante los días 27 y 28 de noviembre de 2005



**FIG. A.3.1** Evolución de la presión mínima de Delta al nivel del mar, en hPa, estimada a partir de diferentes fuentes de datos para los días 27 y 28 de noviembre. AnPr CEP T799: Análisis y predicciones del modelo del CEPPM T799 a 20-25 km de resolución, aproximadamente  
"BT" CNH: Datos del "Best Track Data" generados a posteriori por el CNH  
Anal CEP T799: Análisis del modelo del CEPPM T799 a 25 km de resolución  
Anal CEP T511: Análisis de modelo del CEPPM T511 a 40 km de resolución, aproximadamente  
Avisos CNH: Según los datos de los avisos dados por el CNH.

La estimación de la presión mínima en de los ciclones tropicales es una tarea importante y altamente compleja al situarse estas perturbaciones en zonas marítimas desprovistas de datos. Ocasionalmente, la presencia de boyas o de barcos ayuda a precisar y estimar la presión cuando el ciclón pasa cerca de ellas. Técnicas basadas fundamentalmente en datos de satélite permiten estimar los mínimos de presión de los ciclones.

El CNH en su informe, a posteriori, sobre Delta en su *Best Track Data*, basándose en técnicas satelitarias y datos observacionales descritos en Beven (2006), marca una caída de presión muy notoria en el centro de la baja de 998 hPa, el 27 a las 00 UTC, hasta 982 hPa, a las 27 a las 12 UTC, para, posteriormente, ir rellenándose poco a poco hasta llegar a 985 hPa el 28 a las 12 UTC.

En esta línea, resulta llamativo que los análisis objetivos del modelo del CEPPM para el T511 y T799 no muestren tales variaciones de presión durante los días 27 y 28 como se muestra en la figura A3.1. Las diferencias son notorias entre las 27 a las 00 y 12 UTC donde los análisis del T511, operativo en aquellas fechas, no reflejan ningún cambio significativo en el mínimo depresionario en superficie. El T799 profundiza la baja pero no tanto como el *Best Track Data* del CNH. Los análisis del CEPPM la profundizan débilmente.

Los procesos y técnicas de asimilación de datos e inicialización de los modelos numéricos, como en el CEPPM, pueden haber rechazado algún dato que sí fue considerado por el CNH en su informe final. Las diferencias siguen siendo notorias también cuando se comparan las evoluciones posteriores al 27 a las 12 UTC.

En la Introducción de esta Nota Técnica, se señalaban los datos y metodología a emplear en este estudio: se han utilizado los análisis del CEPPM para la diagnosis de Delta (campos básicos y derivados) y, en particular, el modelo T799. Para las verificaciones de la intensidad y posición de la tormenta tropical se han utilizado las mejores estimaciones según "*Best Track Data*" del CNH.

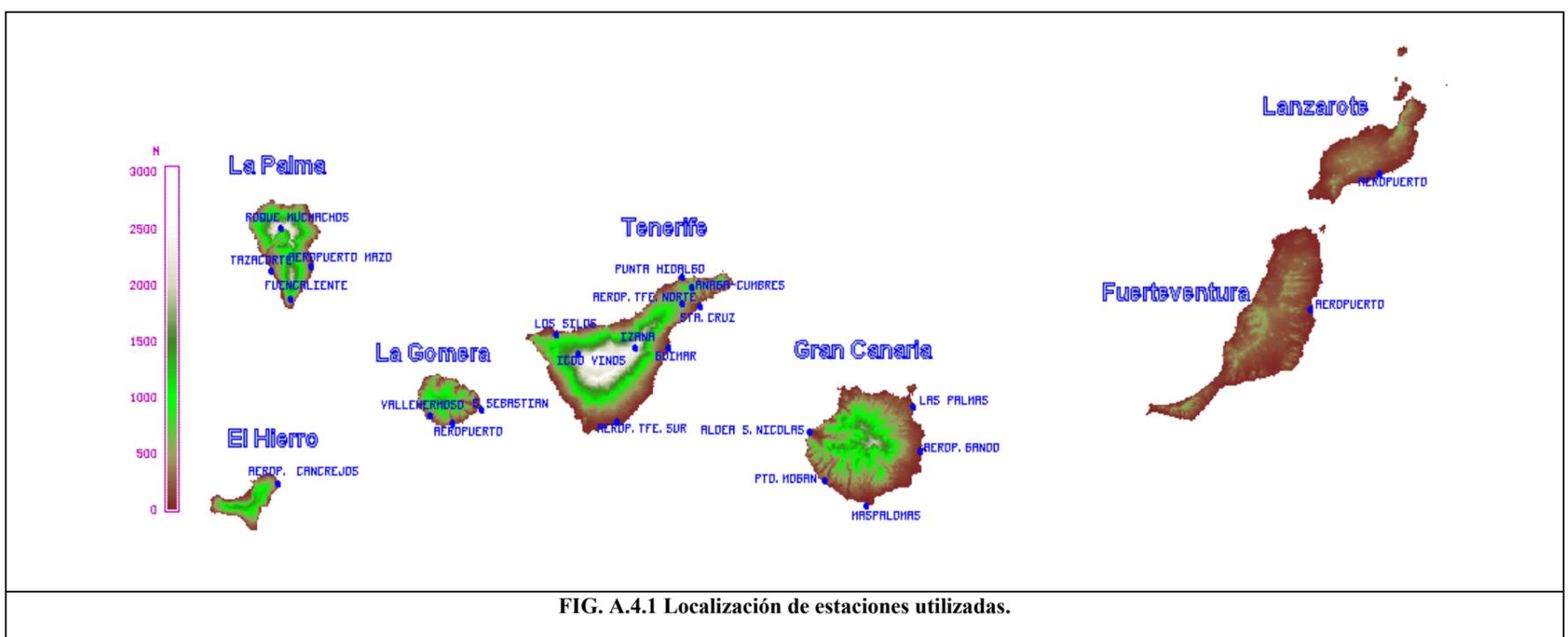
## Anexo IV

### Otros datos meteorológicos

La ubicación de las estaciones del INM utilizadas en este trabajo es la que aparece en la tabla A.4.1 y corresponden a las redes de observación de varias instituciones, además del INM. En la figura adjunta, figura A.4.1 se pueden ver las ubicaciones de dichas estaciones.

Estación	Isla	Institución	Altitud	Características
Roque de los Muchachos	La Palma	IAC	2.382 m.	Estación NOT
Tazacorte	La Palma	INM	10 m.	Estación meteorológica automática
Aeropuerto Mazo	La Palma	INM	40 m.	Observatorio principal y aeronáutico
Fuencaliente	La Palma	INM	690 m.	Anemocinómetro red secundaria
Aeropuerto Los Cangrejos	El Hierro	INM	20 m.	Observatorio principal y aeronáutico
Vallehermoso	La Gomera	INM	225 m.	Anemocinómetro red secundaria
Aeropuerto	La Gomera	INM	275 m.	Observatorio aeronáutico
San Sebastián	La Gomera	INM	15 m.	Estación meteorológica automática
Los Silos	Tenerife	INM	95 m.	Anemocinómetro red secundaria
Icod de los Vinos	Tenerife	ITER	1.685 m.	Estación vulcanológica
Aeropuerto Sur	Tenerife	INM	64 m.	Observatorio principal y aeronáutico
Izaña	Tenerife	INM	2.371 m.	Observatorio principal y estación VAG-OAI
Güímar	Tenerife	ICIA	120 m.	Anemocinómetro de uso agrícola
Aeropuerto Norte	Tenerife	INM	617 m.	Observatorio principal y aeronáutico
Santa Cruz de Tenerife	Tenerife	INM	36 m.	Observatorio principal
Punta del Hidalgo	Tenerife	INM	60 m.	Estación VAG-OAI
Anaga cumbres	Tenerife	ULL	900 m.	Estación meteorológica automática. Dpto. Geografía
Aldea de San Nicolás	Gran Canaria	INM	10 m.	Estación meteorológica automática
Puerto de Mogán	Gran Canaria	INM	10 m.	Estación meteorológica automática
Maspalomas	Gran Canaria	INM	25 m.	Estación meteorológica automática
Las Palmas de G.C.	Gran Canaria	INM	56 m.	Estación meteorológica automática
Aeropuerto Gando	Gran Canaria	INM	24 m.	Observatorio principal y aeronáutico
Aeropuerto El Matorral	Fuerteventura	INM	29 m.	Observatorio principal y aeronáutico
Aeropuerto San Bartolomé	Lanzarote	INM	9 m.	Observatorio principal y aeronáutico

**Tabla A.4.1 Estaciones de observación utilizadas.**



### Gráficas meteorológicas de estaciones no pertenecientes a la red del INM

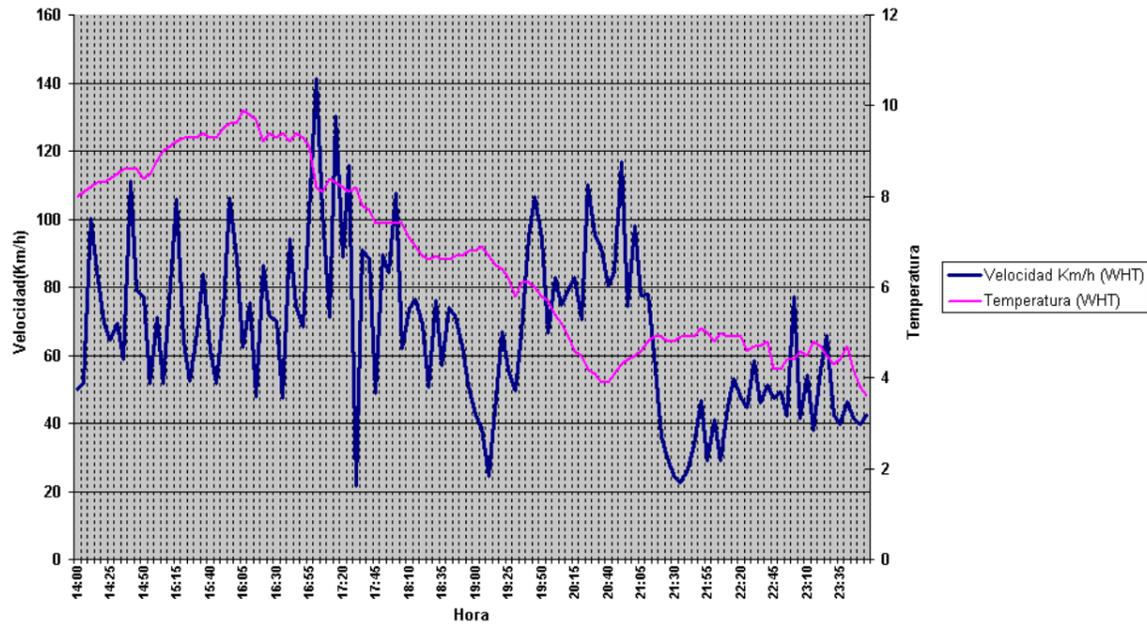
#### a. Datos de las estaciones de los observatorios de astrofísica del Roque de los Muchachos en la isla de La Palma

La mayoría de los observatorios astrofísicos poseen estaciones meteorológicas instaladas en sus cercanías. Todos ellos se sitúan en el Roque de los Muchachos, una zona muy elevada de la isla de La Palma, donde se llega hasta los 2.400 m sobre el nivel del mar. Presentamos a continuación algunos datos enviados amablemente por sus responsables de dichas instalaciones. En sus leyendas aparecen las variables meteorológicas a representar y el telescopio asociado.

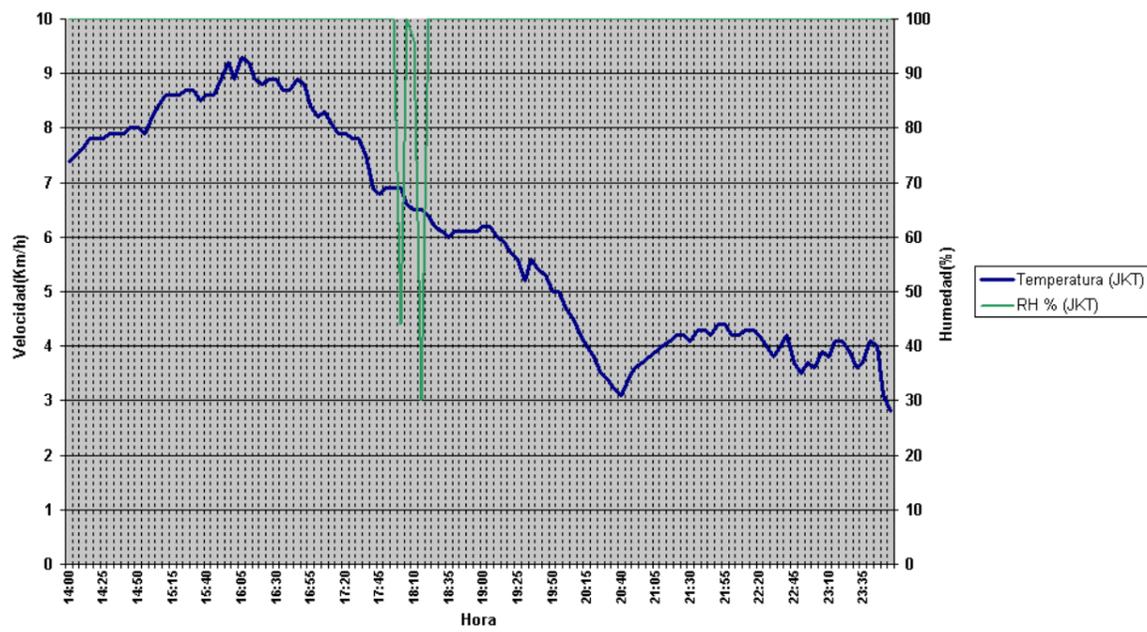
Más información en el Instituto Astrofísico de Canarias, IAC:

<http://www.iac.es/gabinete/orc/index.html>

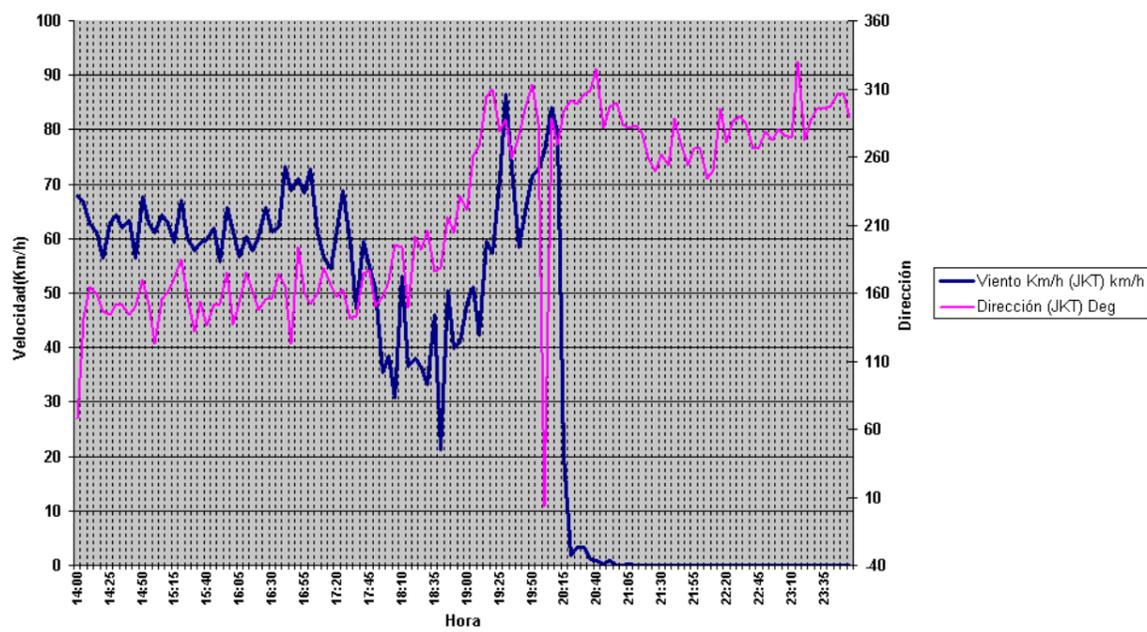
Willian Herschel Telescope



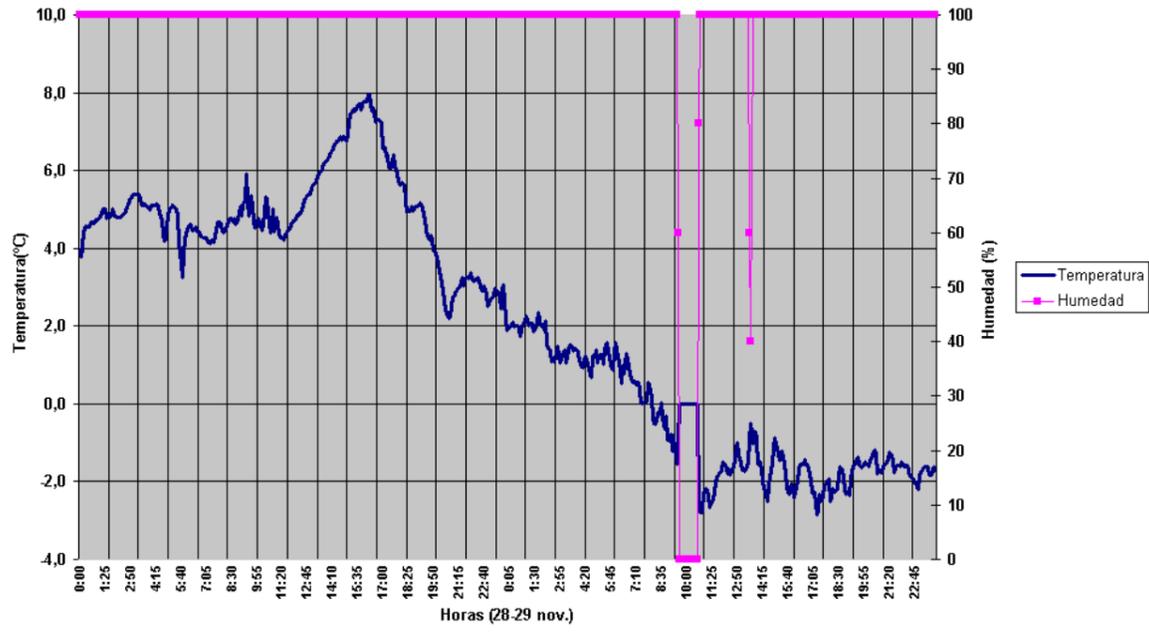
Jacobus Kapteyn Telescope



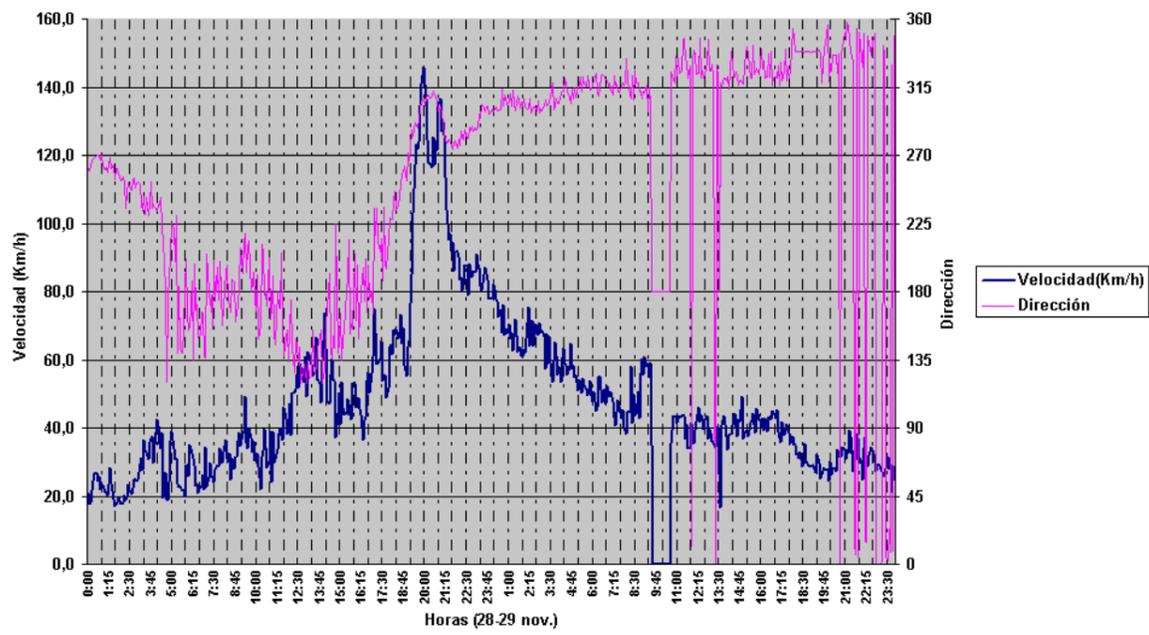
Jacobus Kapteyn Telescope



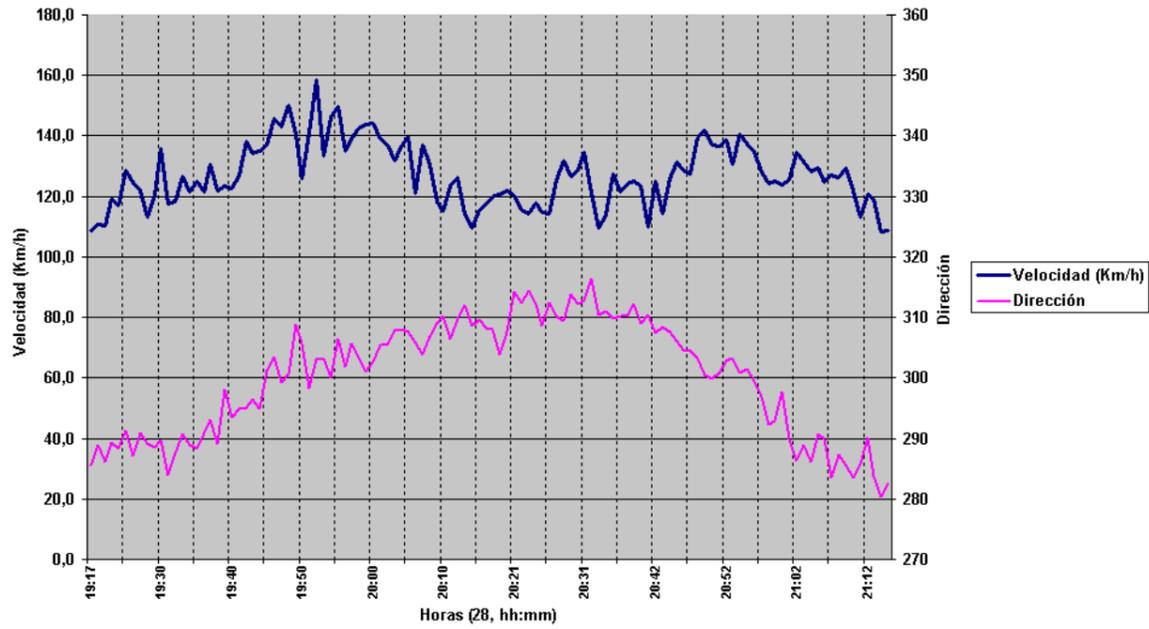
Estación Nordict Optical Telescope



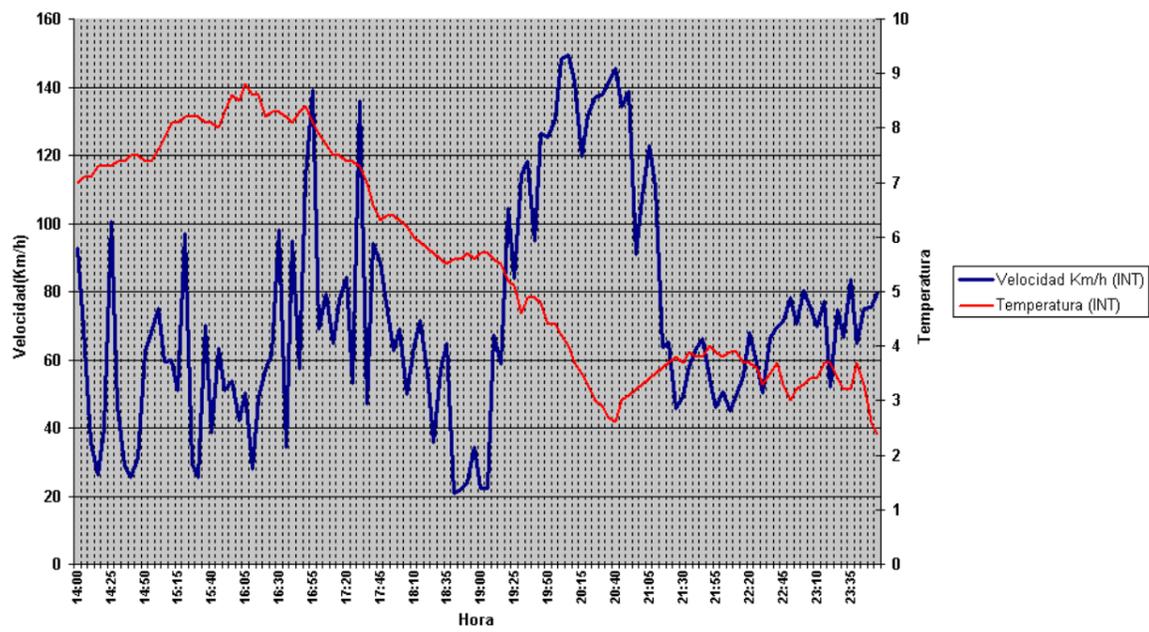
Estación Nordict Optical Telescope



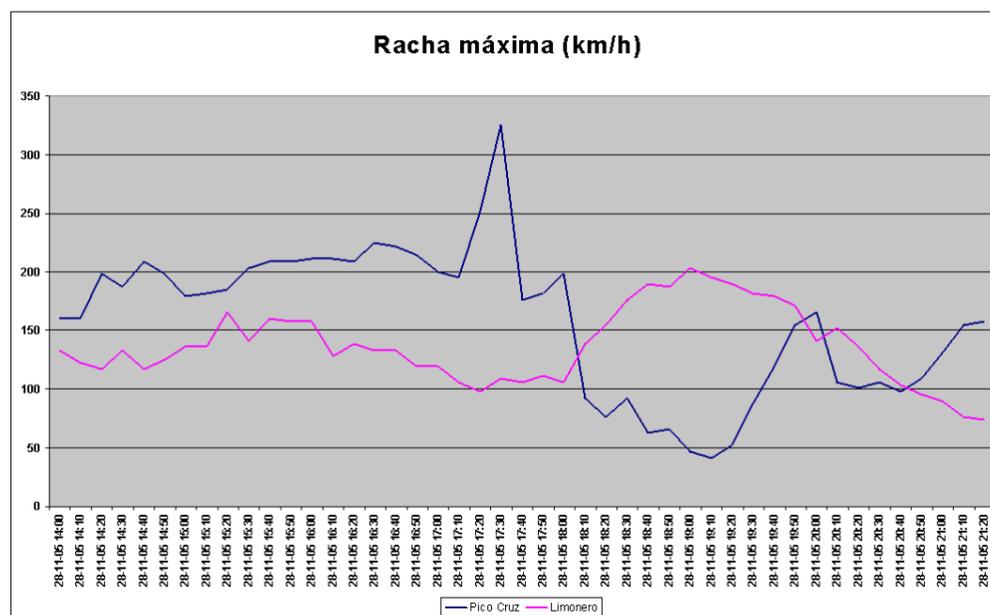
Estación Nordic Optical Telescope

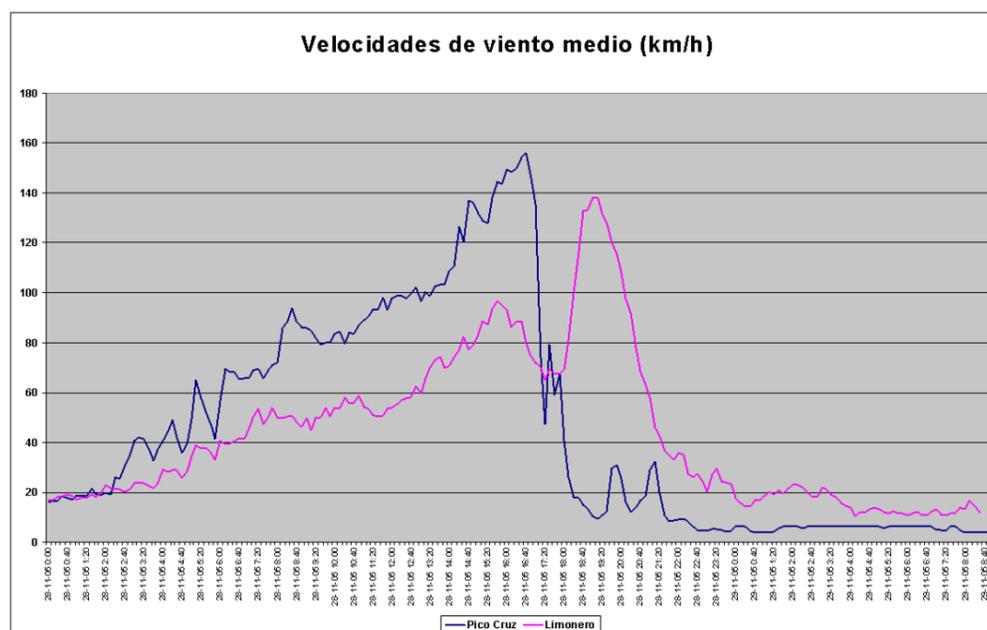
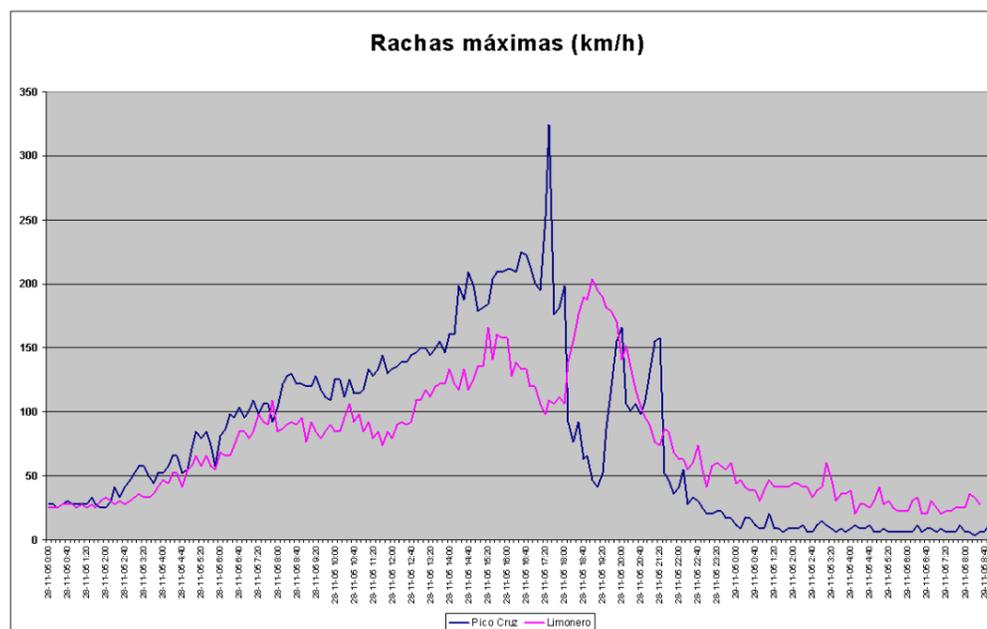
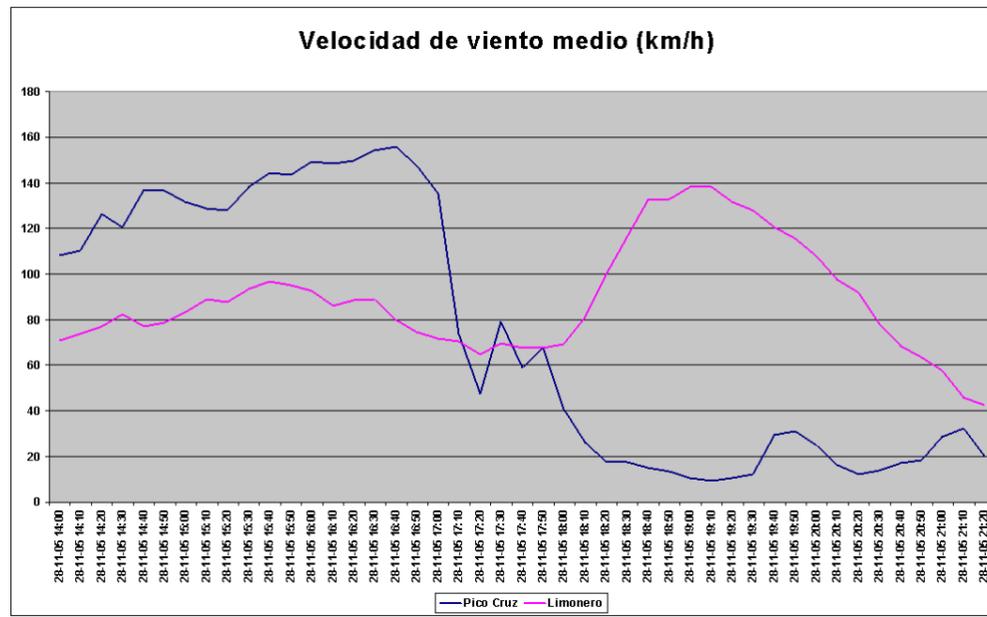


Isaac Newton Telescope



**b. Datos de las estaciones del Parque de la Caldera de Taburiente en La Palma**



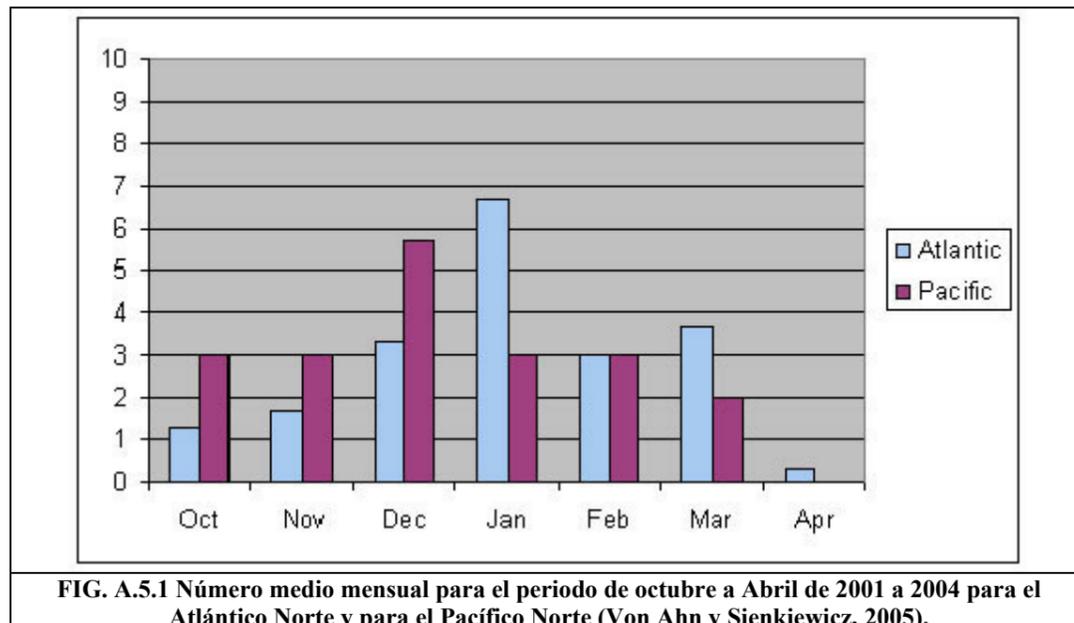


Las estaciones de Pico la Cruz y Limonero están situadas a 2341 m y 2040 m, respectivamente.

## Anexo V

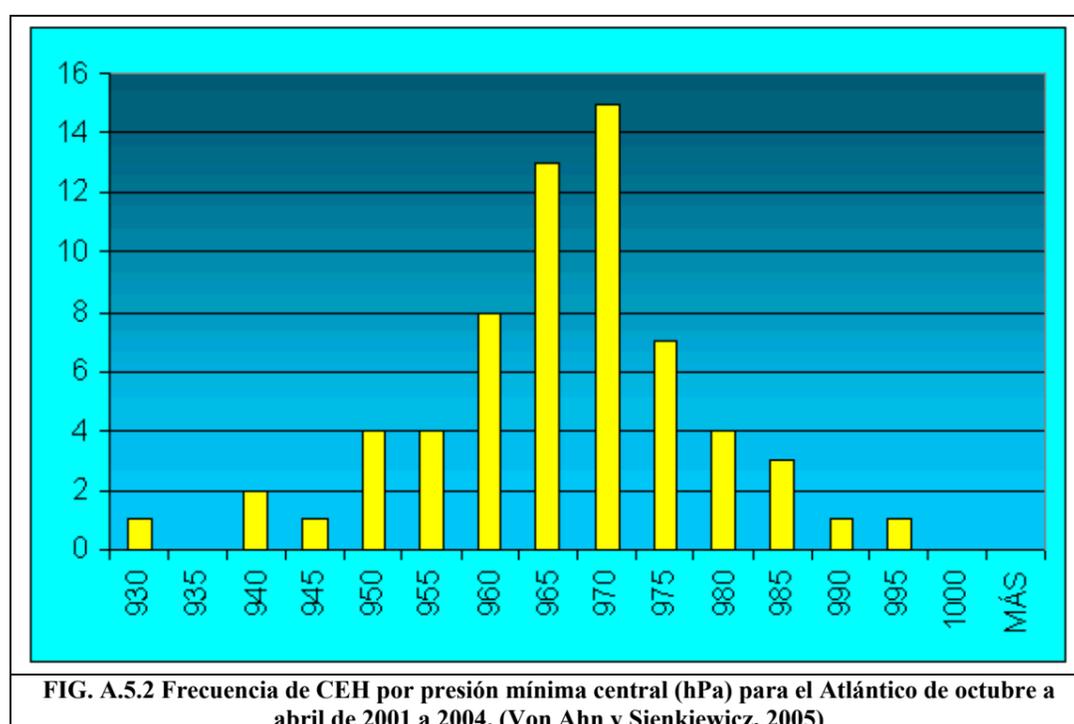
### Sobre vientos huracanados y ciclones extratropicales

Un ciclón extratropical (CE) producto de una TE no es el único tipo de CE que puede generar vientos que pueden alcanzar fuerza huracanada. Las observaciones del QuikSCAT han mostrado la relativa frecuencia con que ocurre CE con vientos huracanados (CEH) sobre los océanos. La importancia del conocimiento de estas perturbaciones la justifica la magnitud de los daños que causan en el mar y en las costas el viento y el oleaje que generan. Un ejemplo notable y conocido fueron las situaciones vividas en diciembre de 1999 cuando un par de CE (Lothar y Martin) incidieron sobre el norte de Francia causando graves daños y cortes importantes en el suministro de energía eléctrica.



Según Von Ahn y Sienkiewicz (2005) de octubre de 2001 a abril 2004 se observaron un total de 120 CEH en el Atlántico Norte y Pacífico Norte (entre 15 y 23 casos por año y océano), definidos como CE con vientos de 64 kt o mayores en algún momento de su ciclo de vida según datos del QuikSCAT, barco o boya. La mayoría se originaron en las latitudes medias y sólo unas cuantas se generaron como TE de ciclones tropicales. Su distribución mensual se muestra en la figura A.5.1 y la distribución de sus presiones centrales en el Atlántico en el momento de la intensidad huracanada en la figura A.5.2. En el Atlántico, la distribución de presiones centrales va de 930 a 995 hPa. Para la mayoría estos ciclones, las condiciones huracanadas ocurrieron a la hora o cerca de la hora de la presión central mínima y duraron menos de 24 horas. La figura A.5.3 representa un modelo conceptual de un CEH, que se corresponde a un ciclón marino del tipo de Shapiro-Keyser (1990) (figura II.45), en la que están trazados la presión a nivel del mar, los frentes y el área de vientos de fuerza huracanada. El área rayada en rojo, que se extiende del sudeste a casi el oeste del centro de la baja, ilustra la zona donde con frecuencia el QuikSCAT observa los vientos huracanados.

Aunque no hay constancia de que los vientos sostenidos alcanzaran la fuerza huracanada, sí lo hacen las rachas. El caso de Delta y probablemente el caso de la ST\_2 se adecuaron bastante a este modelo conceptual de CEH. Probablemente, ambos correspondían al tipo de CE de Shapiro-Keyser y la situación relativa de las Islas Canarias respecto al centro de los ciclones en el momento de los vientos más intensos, encajaría con la zona de vientos huracanados del modelo conceptual, sin olvidar los efectos orográficos particularizados que introduce cada isla al flujo general atmosférico.



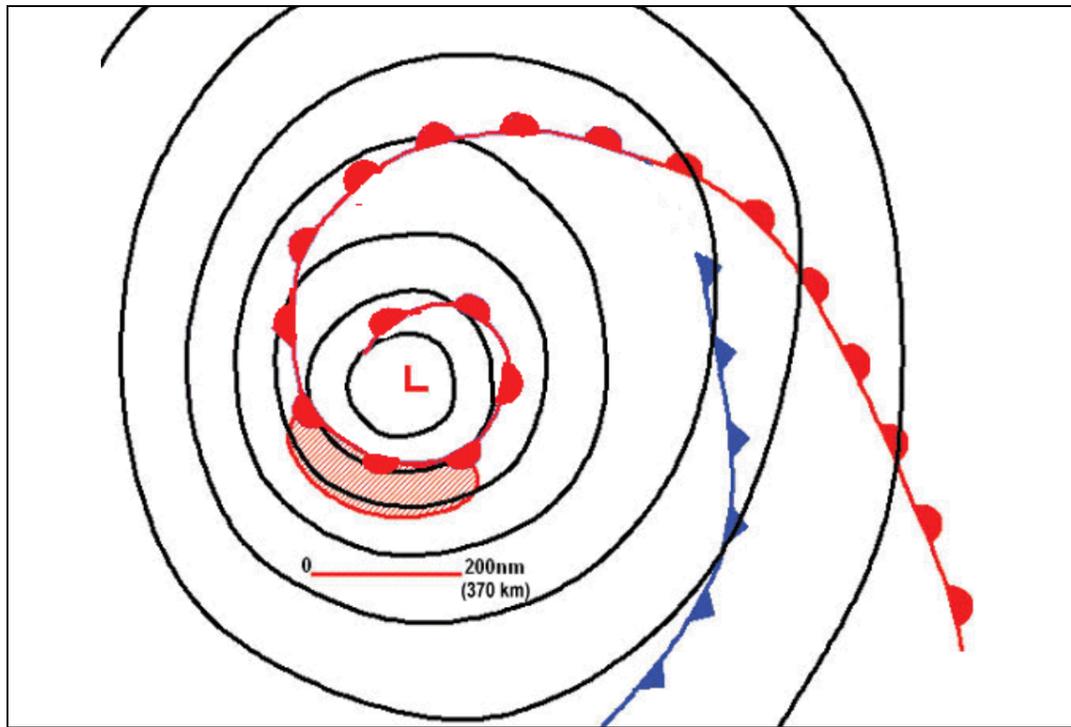


FIG. A.5.3 Modelo de ciclón maduro de Shapiro-Keyser. El área rayada en rojo al sur del centro de la baja es la zona de vientos huracanado (Adaptado de Von Ahn y Sienkiewicz, 2005).