

La física de los huracanes Pauline y Patricia en su paso por el pacífico mexicano

J. Castro López^a, B. Zavala Trujillo^a, and A. Figueroa Lara^b

^a Universidad del Mar Campus Puerto Ángel, Oaxaca México.

^b Centro de Investigación en Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Received 9 August 2018; accepted 6 January 2020

El huracán con más poder destructivo registrado en el océano Pacífico ha sido el huracán Patricia (categoría cinco en la escala de Saffir-Simpson de intensidad) acaecido en el año 2015; el huracán que fué un parteaguas en la cultura y política de prevención de desastres en México fué el huracán Pauline (1997), también en el Pacífico mexicano. Aún con lo anterior la difusión del conocimiento sobre los fenómenos físicos que se ven involucrados en la ciclogénesis y en el movimiento de los huracanes es muy escasa, por lo que en el presente trabajo nos propusimos hacer una introducción a la física de los huracanes exponiendo lo siguiente: la teoría sobre la ciclogénesis de un huracán, una de las teorías más aceptadas sobre el comportamiento de sus trayectorias y conceptos importantes de las ciencias atmosféricas. Se muestran también las principales variables que influyeron en la vida de los meteoros Patricia y Pauline, como son: la presión atmosférica, la temperatura superficial del océano, la dirección y velocidad de los vientos. Por último se hace un análisis sobre la formación y trayectoria de Pauline y Patricia usando la información mostrada y teniendo como base la teoría expuesta (tanto en un marco barotrópico como baroclínico).

Descriptor: Vorticidad; vorticidad potencial; deriva beta; efecto Coriolis; huracán.

One of the most powerful hurricanes that hit the Pacific coast of Mexico has been the Patricia hurricane (category five on the Saffir-Simpson scale of intensity) that occurred in 2015; the hurricane that was a genuine watershed in the Mexican culture and the politics of disaster prevention in Mexico was hurricane Pauline (1997). However, even with the above, the dissemination of knowledge about the physical phenomena that are involved in cyclogenesis and hurricane movement is very scarce, so in this paper we propose to make an introduction to the physics of hurricanes, we address the cyclogenesis theory of a hurricane, one of the most accepted theories about the behavior of its trajectories and important concepts of atmospheric sciences. The main variables that influenced Patricia and Pauline are also discussed, such as: atmospheric pressure, ocean surface temperature, wind direction and speed. Finally, an analysis is made on the formation and trajectory of Pauline and Patricia using the information shown and based on the theory presented (both in a barotropic and baroclinic framework).

Keywords: Vorticity; potential vorticity; beta drift; Coriolis effect; hurricane.

PACS: 01.40.-d; 92.70.Cp; 91.10.Vr

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFisE.17.33>

1. Introducción

El litoral del pacífico mexicano se encuentra dentro de la segunda zona más activa y densa del mundo en cuanto a la formación de huracanes [1]. Lo anterior debido a que la zona típica para la formación de éstos es entre los 10 y 30 grados latitud norte y una temperatura promedio de la superficie del mar de entre los 26 y los 30 grados centígrados. La costa sur del estado de Oaxaca que está en los 15 grados norte y que de manera general en verano la temperatura promedio de la superficie del océano es de entre los 25 y 30 grados celcius, es frecuentemente influenciada por los efectos de los huracanes, como puede ser la lluvia, la baja presión, vientos intensos, humedad, etc., además de haber sido impactada por al menos cuatro huracanes de diferentes categorías. Uno de los huracanes más fuertes que ha afectado el litoral del pacífico mexicano es el huracán Pauline, el cual fue de categoría cuatro en la escala de Saffir-Simpson, dejando un daño valuado en 10,000 millones de dolares según reportes del Departamento de Asuntos Humanitarios de las Naciones Unidas [2]. El huracán Pauline deja en claro que la comprensión del fenómeno es la base fundamental del conjunto de herramientas que nos ayudan a anticiparnos al encuentro con el meteorito. El entender cómo se forma un huracán y los mecanismos de la trayectoria que podría seguir éste puede dar mucho tiempo de ventaja para la toma de decisiones. Este trabajo hace un análisis

de las condiciones meteorológicas y del marco físico que gobernó la ciclo-génesis y las trayectorias de dos de los principales huracanes que han afectado de manera considerable la costa del Pacífico mexicano.

2. Antecedentes teóricos

2.1. Ciclo-génesis de un huracán

La teoría más aceptada sobre la ciclo-génesis, y que cumple en gran manera con las observaciones y mediciones realizadas, es la de la máquina térmica, en donde supondremos para seguir dicha teoría que un huracán se comporta de manera que sigue un ciclo de Carnot, [3]. Dicho ciclo de Carnot consta de:

1. Expansión Isotérmica

- Supongamos que nuestro sistema está formado por un cilindro que en la parte superior está tapado por un pistón móvil, supongamos también que este cilindro encierra un gas ideal (P_1, V_1, T_1), donde este gas ideal se puede expandir o comprimir. Pongamos ahora nuestro sistema en contacto con un foco de calor, el gas entonces al calentarse se expande ejerciendo una fuerza sobre el pistón aumentando el volumen (V_2), dis-

minuyendo la presión (P_2) y manteniendo así la temperatura constante (T_1) dentro del pistón.

- En la formación de un huracán la superficie del mar actúa como un foco o fuente de calor haciendo que el aire se expanda, sin embargo, al tener limitado el desplazamiento hacia arriba debido a la presión atmosférica el aire entonces se dirige hacia el lugar donde la presión atmosférica es menor, siendo en ese lugar donde precisamente se forma el ojo del huracán. El desplazamiento lo hace en forma de espiral sobre la superficie del mar manteniendo la temperatura constante, siendo entonces un proceso isotérmico.

2. Expansión Adiabática

- En este caso no hay flujo de calor hacia el exterior o el interior del sistema, lo que se logra aislando térmicamente el sistema de manera perfecta o haciendo que los cambios sean tan rápidos que no haya tiempo para la transferencia de calor. Así, si el pistón que encierra el gas lo deslizamos de manera brusca hacia arriba, aumentando el volumen del gas, entonces tanto la presión como la temperatura del gas tenderán a disminuir.
- En el caso de un huracán cuando el aire a llegado a la pared del ojo éste asciende de forma adiabática, sobre la pared del ojo, disminuyendo la presión desde aproximadamente 100 Kpa hasta 25 Kpa y disminuyendo la temperatura de aproximadamente 28° celcius hasta -18 grados celcius. Ya estando en la máxima altura alcanzada, que es en la tropósfera, el aire pierde por radiación calor de manera muy rápida produciendo un descenso de temperatura de -18°C hasta -83°C, es en este momento cuando el aire ahora desciende adiabáticamente haciendo que se produzca un aumento de presión y de temperatura hasta alcanzar nuevamente la superficie del mar.

2.2. Movimiento de un huracán

Los estudios teóricos con mayor formalidad y profundidad en cuanto a la trayectoria de un huracán se efectuaron a partir de la década de los 80's, por lo que las contribuciones más significativas han tenido lugar en años recientes, la teoría que más se justifica de acuerdo a las observaciones y a las simulaciones numéricas hechas es la del efecto dirigido [4]. En esta teoría hay dos escenarios, el caso barotrópico y el caso baroclínico. Veamos un esbozo de lo que proponen estas dos situaciones [5,6]:

- En un marco barotrópico la presión es función sólo de la temperatura ya que la densidad se considera constante. Habiendo solamente procesos dinámicos, el movimiento del huracán estará determinado principalmente por:

- La influencia del medio circundante, esto es, que podemos considerar a un huracán como un vórtice que se mantiene flotando en un fluido y que su movimiento está básicamente dirigido por el flujo que rodea al vórtice.
- El movimiento del huracán se verá modificado por la misma vorticidad del huracán y el gradiente horizontal de vorticidad del flujo del medio circundante.

- En un marco baroclínico la densidad es función tanto de la temperatura como de la presión y hay presencia de viento vertical cortante junto con liberación de calor latente. En el caso baroclínico el huracán tenderá a moverse hacia el área donde esté el máximo de vorticidad potencial.

A manera de un esbozo general de la teoría anterior partamos de las siguientes definiciones:

1. Vorticidad.- En un fluido en movimiento con velocidad \vec{v} la vorticidad se define como $\vec{\zeta} = \nabla \times \vec{v}$, la cual es una medida de la rotación del fluido.
2. Vorticidad absoluta.- Cuando se estudia un fluido geofísico la rotación de éste estará dada por dos componentes, la vorticidad relativa que es la vorticidad propia del fluido, esto es, $\vec{\zeta} = \nabla \times \vec{v}$ y la vorticidad planetaria, que es la referente a la rotación de la Tierra y está dada por $2\Omega \sin(\phi)$, donde Ω es la velocidad angular de la Tierra y ϕ la latitud. Luego la suma de estas dos cantidades será la vorticidad absoluta del fluido geofísico en movimiento.
3. Vorticidad potencial.- La medida de la vorticidad en coordenadas lagrangianas es la vorticidad potencial, la cual se visualiza como $[(\zeta + f)]/h$. Físicamente la vorticidad potencial es el cambio de rotación de una columna de fluido, de altura h , con respecto a la altura de esta columna.

Tomemos ahora al vórtice y al medio circundante como un sólo sistema sobre un plano rotatorio e invoquemos la conservación de la vorticidad absoluta, *i.e.* $[\partial(\zeta + f)]/\partial t = 0$. En el primer paso analicemos como actúa la vorticidad planetaria sobre nuestro sistema, la fórmula $2\Omega \sin(\phi)$ nos indica que la vorticidad planetaria está en función de la latitud, así que cuando el aire fluye hacia el norte éste gana vorticidad planetaria y el aire que fluye hacia el sur pierde vorticidad planetaria. Como segundo paso veamos que para la conservación de la vorticidad absoluta la vorticidad relativa debe ser igual pero opuesta a la vorticidad planetaria. Por lo tanto, las parcelas de aire pierden vorticidad relativa cuando viajan al norte y ganan vorticidad relativa cuando viajan al sur. El resultado de los cambios en la vorticidad relativa es un par de giros contrapuestos, llamados giros beta, localizados uno al nor-este del vórtice y el otro al sur-oeste del vórtice. Estos

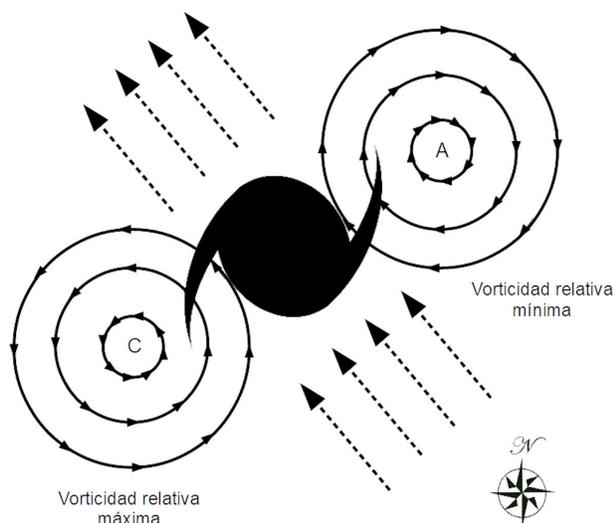


FIGURA 1. Deriva beta

giros producen una circulación secundaria que es suficiente para causar una deriva del vórtice hacia el nor-oeste, la cual se le conoce como deriva beta, Fig. 1.

2.3. Marco barotrópico y marco baroclínico

2.3.1. Proceso barotrópico

La ecuación de vorticidad en un marco fijo de referencia (X, Y) considerando la rotación de la Tierra y en una atmósfera barotrópica es, [7,8]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla (\zeta + f) = 0 \tag{1}$$

donde \vec{u} es el vector de velocidad horizontal, ζ es la vorticidad relativa, f es la vorticidad planetaria y t denota el tiempo.

Consideremos el movimiento de un vórtice simétrico localizado inicialmente en el origen y con una velocidad tangencial $\vec{V}(|\vec{x}|)$ correspondiente a la distribución de vorticidad $\zeta(|\vec{x}|)$. Ahora supongamos que el vórtice se encuentra sumergido en un flujo $\vec{u} = \vec{u}(\vec{x}, t)$ con vorticidad $\bar{\Gamma}(\vec{x}, t)$. Asumamos que el movimiento ocurre sobre el hemisferio norte y en el plano beta en el cual f se incrementa linealmente hacia el polo, *i.e.*, en la dirección Y . Vemos entonces que el flujo total está particionado en:

- El vórtice
- El flujo que lo rodea, conocido como el medio ambiente o el entorno

Designemos por $\vec{x}_c = (x_c, y_c)$ al centro del vórtice, el cual está localizado en donde se encuentra el máximo de vorticidad relativa en el marco de referencia (X, Y) y que este máximo de vorticidad se traslada junto con el centro del vórtice a una velocidad \vec{c} . El flujo del entorno está definido como $\vec{U} + \vec{U}_a$, donde $\vec{U}(\vec{X}, t) = \vec{u}(\vec{x}, t)$, denota el flujo básico,

y $\vec{U}_a(\vec{X}, t)$ es el flujo residual asimétrico que caracteriza la inducción del vórtice. Los campos de vorticidad relativa correspondientes a \vec{U} y \vec{U}_a son $\bar{\Gamma}$ y Γ_a , respectivamente. Utilizando estas cantidades podemos escribir

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\Gamma} + \Gamma_a + \zeta) + (\vec{U} + \vec{U}_a + \vec{u}) \cdot \nabla (\bar{\Gamma} + \Gamma_a + \zeta + f) = -\vec{c} \cdot \nabla f. \tag{2}$$

Puesto que anteriormente se definió el flujo básico como independiente del vórtice, entonces, para éste se cumple que

$$\frac{\partial \bar{\Gamma}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla (\bar{\Gamma} + f) = -\vec{c} \cdot \nabla f. \tag{3}$$

Y entonces el vórtice aislado tiene que cumplir con

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \zeta = 0, \tag{4}$$

sustrayendo la Ec. (3) y la Ec. (4) de la Ec. (2) obtenemos, finalmente, la ecuación que gobierna la evolución de la asimetría del vórtice

$$\frac{\partial \Gamma_a}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla (\Gamma_a + \bar{\Gamma} + f) = -\vec{U} \cdot \nabla (\Gamma_a + \zeta) - \vec{U}_a \cdot \nabla (\bar{\Gamma} + \Gamma_a + \zeta + f). \tag{5}$$

En la Ec. (5) es claro el dominio que tienen los términos advectivos de los diferentes elementos que conforman toda la estructura vórtice-entorno, esto es, la principal contribución es de la advección que produce la vorticidad del entorno junto con la del vórtice mismo. Notemos que se encuentra también la influencia del efecto beta en todo el movimiento.

2.3.2. Proceso baroclínico

En una atmósfera baroclínica pueden presentarse gradientes horizontales de temperatura, por las escalas en la atmósfera y debido al balance hidrostático los gradientes mencionados producen cizalladura o cortante del viento junto con vorticidad horizontal, del mismo modo cuando se tenga cortante del viento se producirán gradientes horizontales de temperatura y vorticidad horizontal. Se puede visualizar que el cortante del viento y los gradientes horizontales de temperatura tendrán que modificar la estructura vertical del huracán. También es fácil darse cuenta que tendrá que haber una fuerte convección de calor, asociada al calor latente. Podríamos decir entonces que debido a una atmósfera baroclínica se presentan los siguientes fenómenos.

1. Se modifica la estructura vertical del huracán.
2. Debido a este cambio en la vertical, la vorticidad relativa también se verá afectada, trayendo como consecuencia que la deriva beta sienta esa influencia
3. Calor convectivo que dará origen a transporte de momento y de calor a las diferentes capas del huracán.

De lo anterior, tenemos que el cambio en la temperatura de la estructura del huracán producirá un cambio en la distribución de la vorticidad potencial (PV). En este caso la vorticidad potencial se define como, [7,8]:

$$q = (\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad (6)$$

donde θ es la temperatura potencial definida por

$$\frac{T}{\theta} = \left(\frac{p}{1000} \right)^{R/C_p} \quad (7)$$

donde T es la temperatura, p es la presión usada en la coordenada vertical, R es la constante de gas para el aire seco y C_p la capacidad calorífica específica. Wu y Wang (2000) propusieron lo siguiente:

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} = \Lambda_1 [\{A. H.\} + \{A. V.\} + \{C.D.\} + \{Fricción\}], \quad (8)$$

donde $A.H.$ es la Advección Horizontal, $A.V.$ es la Advección Vertical, $C.D.$ es el calor por convección o calor y Λ_1 es un operador que actúa sobre los términos anteriores. Ahora bien Wu, Wang y Chan encontraron de sus observaciones que el huracán se moverá hacia el área de $\max\{\partial q/\partial t\}$. Los términos para la Advección Horizontal, la Advección Vertical, el calor por convección y la fricción tienen en la literatura diferentes propuestas que son utilizadas en modelos numéricos que calculan las trayectorias de los huracanes. En resumen un marco conceptual general describe que el movimiento de un huracán será hacia el área de máxima vorticidad, y sus principales contribuciones son la Advección Horizontal y la convección de calor.

2.3.3. Viento geostrófico, altura geopotencial y estructura atmosférica

El estado del aire a diferentes alturas define la estructura atmosférica en la vertical, esta estructura puede variar en su posición a distintos tiempos debido al cambio en el clima y a la actividad solar principalmente, esta variación en la altura significa mover las parcelas de aire en contra o a favor de la fuerza de la gravedad, por lo que hay una pérdida o ganancia de energía, resulta entonces más conveniente definir una altura en términos de superficies equipotenciales ya que en éstas no hay variación de energía. Estas superficies equipotenciales se denominan geopotenciales y se definen como

$$\phi = \int_0^z g * z dz,$$

tomando $g = cte$ se obtiene $\phi = gz$ y con esto entonces podemos definir la altura geopotencial dividiendo entre 9.8

$$z = \frac{\phi}{9.8} = \frac{g * z}{9.8}.$$

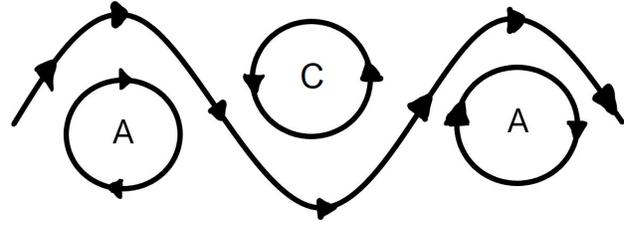


FIGURA 2. Giros anti-ciclónicos, (A), y giros ciclónicos, (C).

Así en meteorología un mapa de altura geopotencial para un sólo nivel de presión en la atmósfera muestra los contornos de nivel de las diferentes alturas a las que se encuentra esa presión, estos pueden ser usados para calcular el viento geostrófico.

El viento que se produce cuando el gradiente de presión empuja las parcelas de aire y éstas son desviadas por la fuerza de Coriolis es conocido como viento geostrófico y que se expresa de la siguiente manera

$$-fv = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}.$$

En particular un mapa a 700 milibares representa el estado de la atmósfera a los aproximadamente 3000 metros de altura y es óptima para determinar el desplazamiento general de las tormentas, la intensidad de éstas y las zonas de vaguadas (V). También se observan las bajas y altas presiones que dan origen a giros ciclónicos y anti-ciclónicos que, a su vez, forman canales por donde pueden desplazarse los vientos a manera de banda transportadora, Fig. 2.

3. Pauline 1997

La onda tropical que originó la génesis del huracán Pauline salió de la costa occidental africana el día 16 de septiembre de 1997 llegando el 26 de septiembre a la costa occidental de Panamá en el océano Pacífico, empezó a formarse una estructura coherente a partir del día tres de octubre, en la posición 12.8 grados en la latitud y -96.58 grados en la longitud. Esta estructura se desplazó de Oeste a Este en el sur de México. Ya el día seis de octubre se convertiría en la Depresión tropical N° 18 y se encontraba a 250 Km al Sur de Puerto Ángel y en cuestión de 12 horas se convirtió en huracán categoría 4. La teoría del efecto dirigido, desde un marco barotrópico, nos dice que el vórtice únicamente sentirá la influencia del entorno y de la vorticidad generada por él mismo. Lo anterior nos hace seguir la siguiente serie de pasos que nos ayudan a visualizar el comportamiento del huracán Pauline como consecuencia de vaguadas, de giros ciclónico y giros anti-ciclónicos.

- Se grafican los mapas de contornos de la altura geopotencial a 750 milibares durante los días que duran los meteoros.

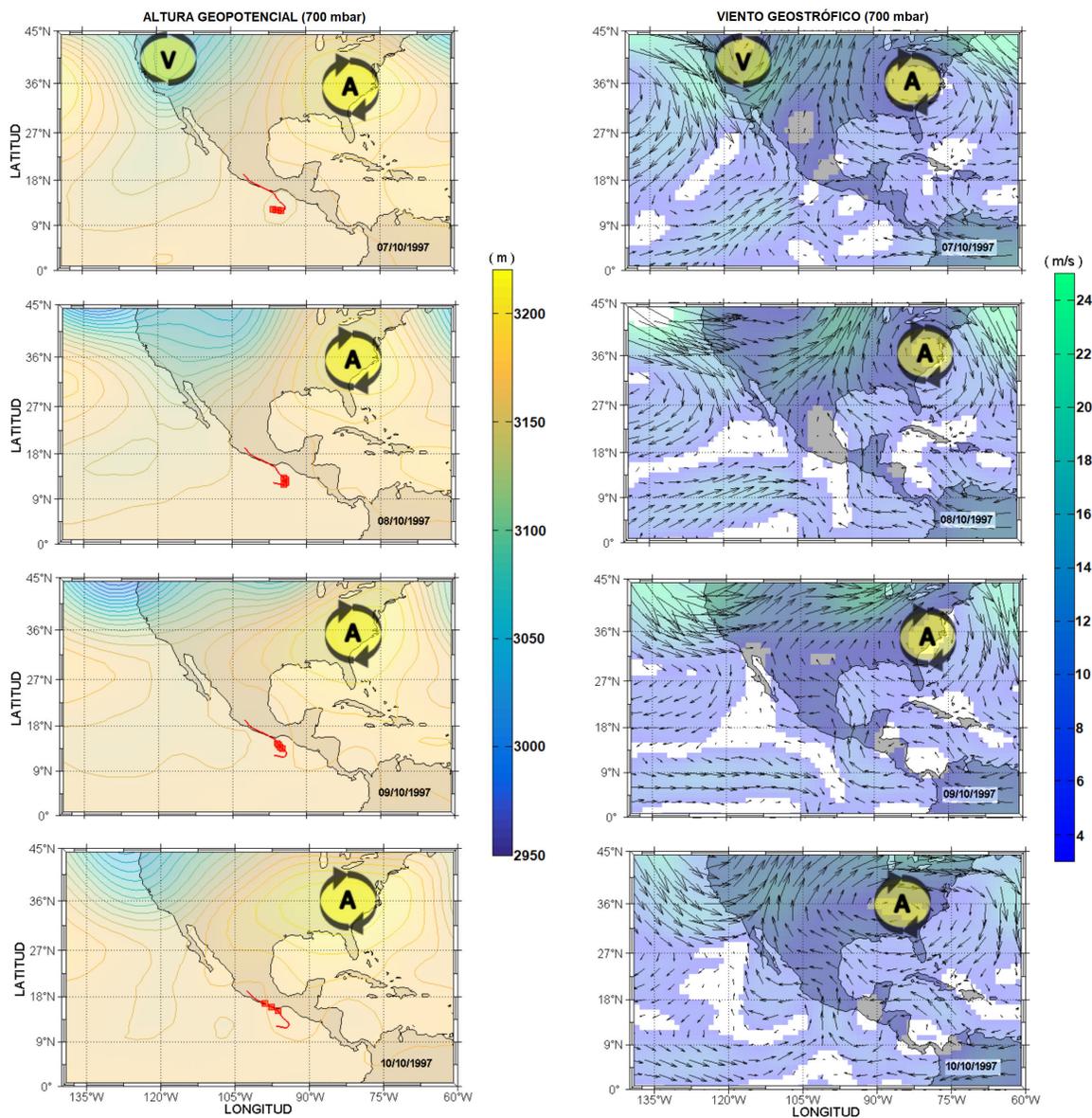


FIGURA 3. Altura geopotencial a 750 mbar, trayectoria del huracán (línea roja), giros ciclónicos (C), giros anticiclónicos (A), Vaguadas (V) y viento geostrófico. Los cuadros sobre la trayectoria indican la posición del huracán en el día indicado.

- Los mapas de contorno de la altura geopotencial identifican las zonas donde la baja presión permite la convergencia de viento de gran intensidad que (por la teoría del efecto dirigido) es el principal factor que controla el movimiento de los huracanes.
- Junto a los contornos de altura geopotencial se grafica la trayectoria que siguió Pauline con la finalidad de apreciar de mejor manera que el movimiento de los vientos y del huracán es a lo largo de los canales que conforman los contornos de altura geopotencial. En la trayectoria los cuadros sobre ésta representan al huracán a lo largo del día señalado, Fig. 3.
- Se muestra también en otra gráfica de manera simultánea el viento geostrófico que predominó durante

los eventos y que al igual que los huracanes sigue las pendientes de la alta a la baja presión, Fig. 3.

Claramente se puede observar, en la Fig. 3, que el día siete de octubre a los aproximadamente 36° Norte en el suroeste de Estados Unidos se encuentra una vaguada y a los mismos 36° Norte pero en el sur-este de Estados Unidos hay una alta presión, estas dos distribuciones de presión forman giros ciclónicos y anti-ciclónicos que dan lugar a un canal de viento que atraviesa en diagonal a la República Mexicana que va desde la costa sur-oeste hacia el nor-este del país, haciendo que los vientos junto con Pauline se desplacen a lo largo de ese canal los días ocho, nueve y diez de octubre que fue cuando se degradó a tormenta tropical.

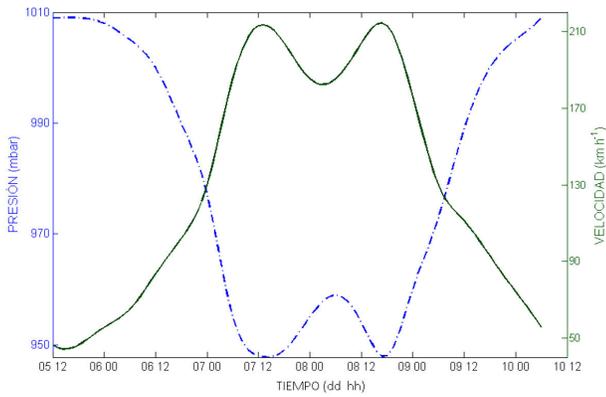


FIGURA 4. Presión y velocidad del viento alcanzados por el huracán Pauline.

Por último mostramos en la Fig. 4 las presiones y las velocidades alcanzadas por el huracán Pauline.

4. Patricia 2015

El huracán Patricia se considera el que ha sido el huracán más peligroso del océano Pacífico llegando a alcanzar la categoría 5 en la escala de Saffir-Simpson, este huracán tuvo vientos máximos de hasta 345 Km/hr y un mínimo de presión de 852 hPa. De acuerdo al National Hurricane Center (NHC) un sistema coherente localizado en las proximidades del Golfo de Tehuantepec ya se encontraba consolidado el 17 de Octubre. La depresión tropical se declaró huracán el día 21 de octubre a las 03:00 UTC, a las 18:00 UTC del 22 de octubre Patricia

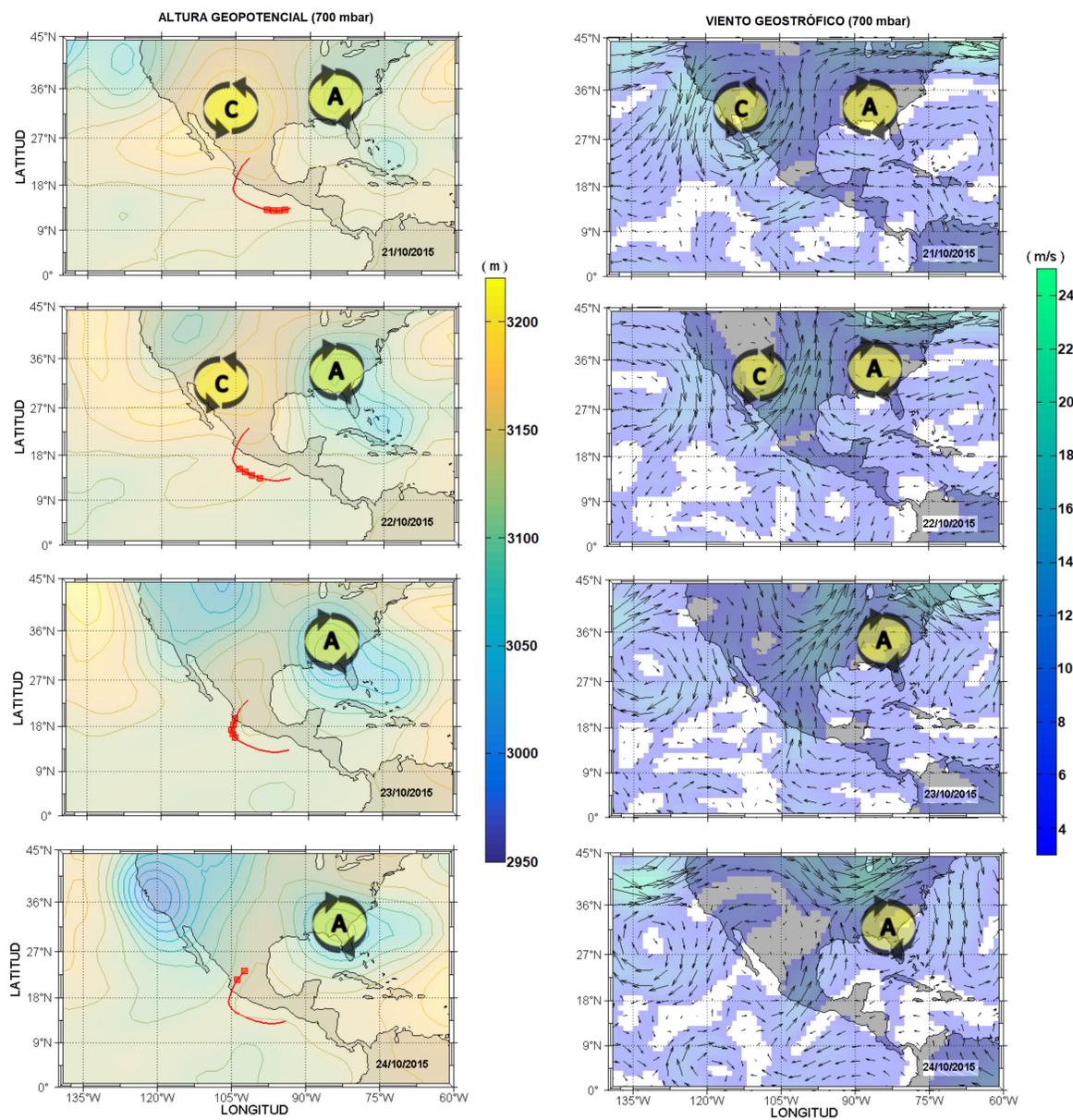


FIGURA 5. Altura geopotencial a 750 mbar, trayectoria del huracán (línea roja), giros ciclónicos (C), giros anticiclónicos (A), Vaguadas (V) y viento geostrófico. Los cuadros sobre la trayectoria indican la posición del huracán en el día indicado.

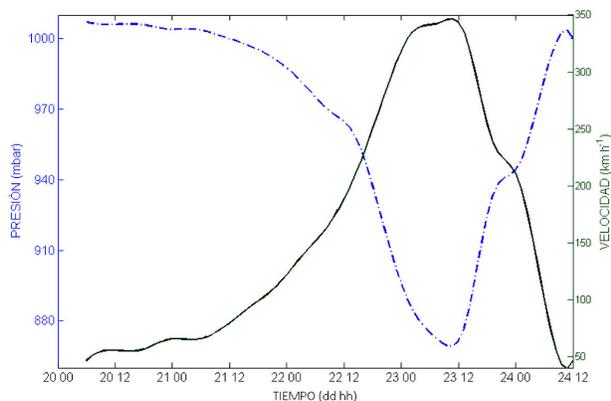


FIGURA 6. Presión y velocidad del viento alcanzados por el huracán Patricia.

alcanzaba la categoría 4 para que el día 23 a las 09:00 UTC finalmente obtuviera la categoría 5. El día 23 de octubre a las 23:15 UTC Patricia tocó tierra y su fuerza disminuyó hasta convertirse en depresión tropical a las 15:00 UTC.

Nuevamente se observa de manera clara como el huracán y los vientos se mueven a lo largo de los canales formados por los contornos de altura geopotencial, Fig. 5. Se observa un giro ciclónico en el territorio de Estados Unidos entre los 27°N y los 36°N en la latitud y a los 105°W en la longitud, también vemos un giro anti-ciclónico a los 36°N y entre los 90°W y 75°W. Estas distribuciones que en conjunto producen una corriente de viento dirigen la trayectoria de los vientos junto al huracán Patricia.

Por último mostramos en la Fig. 6 las presiones y las velocidades alcanzadas por el huracán Patricia.

En la Fig. 6 podemos ver como la presión cayó de manera abrupta, de 985 mb a los 852 mb, en cuestión de horas, del día 22 de octubre al 23 de octubre, lo que generó viento de 140 m/s a 345 m/s. Lo anterior hace a Patricia el huracán más intenso registrado en el océano Pacífico.

5. Discusiones

El primer punto a tomar en cuenta es que tanto el año 1997 y el 2015 fueron años donde se presentó el fenómeno del Niño y dentro de las características que presenta este fenómeno es que

- la temperatura del océano es anormalmente alta,
- hay un debilitamiento de los vientos del Este y un fortalecimiento de los vientos del Oeste.

El fenómeno del Niño consiste en un desacomodo de la circulación atmosférica debilitando los vientos alisios y provocando que haya circulación de aguas cálidas del este de Australia a la costa Oeste de Sudamérica para después ascender a lo largo de la costa hacia latitudes más norteñas, junto con éstas aguas cálidas se arrastra humedad, viento ascendente, baja presión y lluvias, haciendo un nuevo ajuste en las altas y bajas presiones produciendo que los giros ciclónico y anti-ciclónicos tengan nuevos patrones. En ambos casos Pauline (1997) y Patricia (2015) se aprecia claramente como éstos se ven sometidos a la dirección del viento, que a su vez sigue el patrón que forman los giros ciclónicos y anti-ciclónicos de las altas y bajas presiones. En el año 2015 se alcanzó un máximo de temperatura superficial del océano en el Pacífico mexicano de 31°C, lo que hace suponer que hizo que la intensidad del huracán alcanzara la categoría cinco, ya que la energía acumulada en forma de calor era más grande que el promedio presentado.

6. Conclusiones

La teoría del efecto dirigido propone los siguientes factores que determinan el comportamiento de la trayectoria de un huracán

- La deriva beta, la cual consiste en una desviación hacia el nor-este debida a la vorticidad misma del huracán.
- El gradiente en la temperatura del océano el cual provoca alteraciones en los vientos ascendentes de la pared del ojo del huracán que a su vez modifican la dirección en la horizontal.
- Finalmente el más importante es el movimiento del entorno el cual dirige prácticamente casi toda la trayectoria del huracán.

El factor principal en la trayectoria del movimiento de un huracán es el movimiento del fluido circundante, éste fluido circundante obedece la distribución de las zonas de alta y baja presión, las cuales son generadoras de vientos de gran intensidad y que arrastran o dirigen la trayectoria de los huracanes.

Hay una carencia para el público no especializado de la física que está detrás de la formación y desarrollo de los huracanes, este trabajo pretende contribuir a la difusión de este conocimiento.

1. L. Bengtsson, L.O, *Models, Systems and Users* **1** (1976) 254-419.
2. Reporte interno del DAHNU, *Mexico Hurricane Pauline Situation Report No.1* (2015), <http://www.notes.reliefweb.int>,
3. S. Reyes-Coca, R. Troncoso-Gaytán, *Rev. Ciencia y Mar* **5**

(1999) 3.

4. J. Chan, and R. Williams, *J. Atmos. Sci.*, **44** (1987) 1257.
5. L. Wu, X. Chen, *Atmos-Chem. Phys.* **10** (2016) 14925.
6. R. Rotunno, and E. Kerring, *J. Atmos. Sci.* **44** (1987) 542.
7. J. Chan, *Annual Review of Fluid Mechanics.* **37** (2005) 99.

8. W. Lang, *Mon. weather Rev.* **128** (2000) 1899.
9. Contribución de Chris Landsea (NHC), www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A5_esp.html, (2011).
10. S. Hirahara, M. Ishii, and Y. Fukuda, *J. of Climate* **27** (2014) 57.
11. R. Pawlowicz, *M Map: A mapping package for MATLAB*, (2019). Version 1.4k, Computer software, available online at www.eoas.ubc.ca/~rich/map.html