

Influencia de la dinámica oceánica relacionada al ENSO en la modulación de la actividad de los Ciclones Tropicales en el Pacífico Oriental



Dr. Julien Boucharel

LEGOS, UNIVERSIDAD DE TOULOUSE (FRANCIA)

Es doctor en Oceanografía Física, trabaja en el Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales en Toulouse, Francia y en la Universidad de Hawái, Manoa, Honolulu. Su investigación se centra principalmente en la dinámica de El Niño - Oscilación del Sur (ENOS) y en cómo se ve afectada por el aumento continuo de los gases de efecto invernadero. Además, utiliza una variedad de resultados de modelos climáticos (desde complejidad intermedia hasta modelos de circulación general de tecnología de punta y completamente acoplados) para evaluar los procesos físicos relevantes involucrados en la dinámica ENOS, particularmente en la cuenca del Pacífico Oriental Tropical. Actualmente, investiga las relaciones entre la fase ENOS y la actividad de los ciclones tropicales en esta región clave, así como en la cuenca atlántica. Recientemente, recibió una beca muy importante del departamento francés de investigación y educación bajo la iniciativa "Haz que nuestro planeta vuelva a ser grande".

Los huracanes son de los fenómenos más destructivos que hay en la Tierra y afectan a millones de personas, principalmente en la región de Asia-Pacífico, las costas occidentales y centrales de Norteamérica, así como en las islas del Atlántico y Pacífico. La variabilidad climática natural modula fuertemente la estadística de la actividad de los huracanes en varias escalas de tiempo. En particular, la conexión entre El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) y la actividad de los huracanes ha sido ampliamente estudiada en las últimas décadas en todas las regiones oceánicas. Sin embargo, los mecanismos relacionados al ENSO que controlan tanto en la génesis e intensificación de los huracanes continúan siendo inciertos. En este artículo se hará una revisión de los recientes progresos alcanzados para comprender la influencia de la dinámica del océano superior, en particular relacionada al ENSO,

en la actividad de los huracanes en el Pacífico Central-Oriental. Asimismo, se examinará cómo estos avances pueden ser de suma utilidad para mejorar el pronóstico de huracanes.

INTRODUCCIÓN

El Pacífico Central-Oriental (CEP, por sus siglas en inglés), el cual abarca tanto las regiones del Pacífico Central y Oriental (ver en la Figura 1a), es la segunda región en donde existe mayor actividad de los Ciclones Tropicales (TC, por siglas en inglés), con un promedio de 17 huracanes por temporada (Neumann, 1993). Sin embargo, los factores circundantes que regulan esta actividad en escalas de tiempo que van desde las sub-estacionales hasta las decadales siguen siendo inciertos

(Dong y Holland, 1994; Peduzzi et al., 2012; Wang y Lee, 2009). Los TC en la región CEP pueden tener consecuencias económicas muy fuertes en la costa sur-occidental de Estados Unidos, México, Hawái, así como afectar las rutas marítimas militares y comerciales entre estas áreas (Court, 1980; Englehart y Douglas 2001; Jauregui, 2003; Corbosiero et al., 2009; Ritchie et al., 2011; Raga et al., 2013; Wood y Ritchie, 2013). En las últimas cuatro temporadas (2014-2017), todas han estado por encima del percentil 75 de la "Energía Ciclónica Acumulada" (ACE, por sus siglas en inglés), el cual es un clásico proxy de la actividad de los TC (Bell et al., 2000), desde el año 1960 (ver Figura 1b). Algo sin precedentes sucedió en setiembre del año 2015, tres huracanes de Categoría 4 se desarrollaron en los alrededores de Hawái, sin causar daños significativos en la región. Algunas semanas después el huracán Patricia se desarrolló rápidamente frente a las costas de México como el huracán más intenso jamás registrado, con vientos que alcanzaban magnitudes por encima de 185 nudos (Huang et al., 2017). El Niño Extremo 2015/2016 habría provocado en el año 2016 una temporada de huracanes de mucha actividad, con una intensidad incrementada en el Pacífico Central (Boucharel et al., 2016c). Esto resalta la importancia de comprender el

entorno que controla la actividad de los huracanes para la mejora de los pronóstico en esta región.

Se sabe que la variabilidad climática natural modula fuertemente la estadística de la actividad de los TC en múltiples escalas de tiempo (Elsberry, 1987). En particular, el ENSO, que es la fuente más grande de variabilidad climática interanual en el mundo (McPhaden et al., 1998). La conexión entre los índices de la actividad de los TC (por ejemplo, cantidad, intensidad, etc.) y ENSO viene principalmente de estudios empíricos que han sido derivados en relaciones estadísticas (Camargo et al., 2010). Los mecanismos físicos de fondo responsables de esta relación han sido estudiados pero aún la comprensión de estos procesos es limitado.

Lo que se conoce es que ENSO modula fuertemente la actividad de los TC en la región CEP, con una alta actividad durante la fase de desarrollo de El Niño (Chu y Wang, 1997; Toma and Webster, 2010; Wood and Ritchie, 2013; Huang et al., 2017). Los cambios provocados por El Niño sobre la anomalía de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) pueden alterar las condiciones atmosféricas, tal como su estabilidad, la cizalladura vertical del viento y la humedad relativa (Chu y Wang, 1997; Collins y

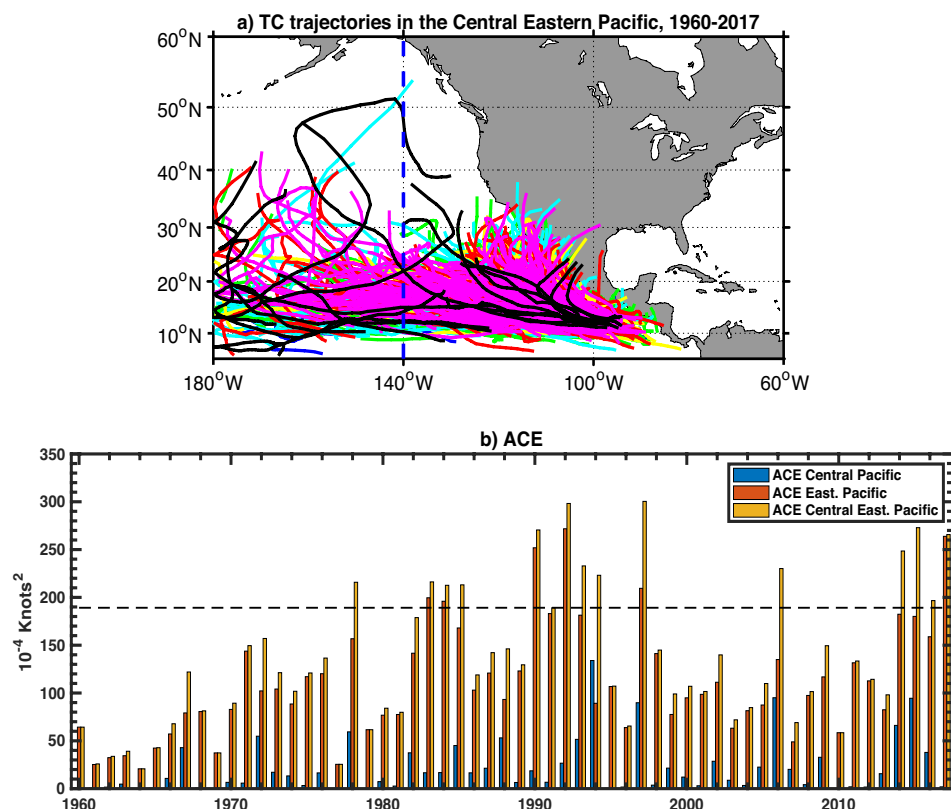


Figura 1. Actividad de los huracanes en la cuenca del Pacífico Central-Oriental (CEP)

Panel a. Trayectorias de los Ciclones Tropicales en las cuencas del Pacífico Central (a la izquierda de la línea vertical cortada de color azul) y Oriental (a la derecha de la línea vertical cortada de color azul) durante el periodo 1960-2017. Las líneas de color azul son para Depresiones Tropicales y cian para Tormentas Tropicales. Para el caso de Huracanes, su categoría se representan por las líneas de color: verde (Categoría 1), amarillo (Categoría 2), rojo (Categoría 3), magenta (Categoría 4) y negro (Categoría 5).

Panel b. Energía Ciclónica Acumulada (ACE, por sus siglas en inglés) calculada sobre las cuencas del Pacífico: Central (barras azules), Oriental (barras anaranjadas) y Central-Oriental (barras amarillas). Las líneas cortadas horizontal de color negro representa el valor del percentil 75th de la ACE. La ACE es calculada para cada TC como la suma de los cuadrados de las velocidades máximas de los vientos superficiales sostenidas durante 1 minuto por encima de 35 nudos a intervalos de seis horas durante el tiempo de vida de la tormenta (Bell et al., 2000). La información es obtenida de los mejores archivos de trayectorias de NOAA's Tropical Prediction Center.

Mason, 2000; Collins 2007; Camargo et al., 2008). ENSO tiende a promover un aumento general del número de TC intensos (Gray and Sheaffer, 1991), así como el desplazamiento de sus trayectorias hacia el oeste, esto como consecuencia de un cambio longitudinal de la región principal de la génesis de los huracanes durante el desarrollo de los eventos El Niño (Irwin y Davis, 1999; Kimberlain, 1999; Chu y Zhao, 2007; Wu y Chu, 2007; Camargo et al., 2008). Usando *composites* del índice potencial de la génesis de los huracanes para diferentes fases del ENSO, Camargo et al. (2007) concluyen que la cizalladura vertical del viento es el principal contribuyente que modula la actividad de los TC durante el ENSO en esta región. Sin embargo, el análisis de la modulación que ejerce el ENSO en el entorno y en la actividad de los TC pueden depender de la elección de un sub-dominio del CEP (Collins y Mason 2000).

Recientemente se ha iniciado una línea de investigación que sugiere que la capa superior del océano puede generar una reserva de calor relevante que permite una mejor estimación teórica de la máxima intensidad de los TC (Lin et al., 2008 y 2013). Después de esto, tanto en los estudios de modelados como observacional, se resalta un rol importante de las propiedades subsuperficiales (tales como la profundidad de la termoclina, salinidad y estratificación) en la intensificación de los TC (e.g. Balaguru et al., 2012 y 2013; Lin et al., 2013b; Vincent et al., 2014), predominantemente en la zona CEP. De hecho, la región de influencia de los TC en esta cuenca se ubica encima de una zona de poco contenido de calor (Boucharel et al., 2015). El contenido de calor en esta región es usualmente muy baja para influir en la

intensificación de los TC, pero la estructura vertical es fuertemente estratificada, tal que pequeñas variaciones en la profundidad de la termoclina puede contribuir significativamente a anomalías subsuperficiales. En particular, la modulación de la actividad de los TC en esta región es fundamentalmente afectada por los procesos de la capa superior del océano relacionada a la variabilidad del ENSO y, en líneas generales, a la dinámica del océano tropical en un rango amplio de escalas de tiempo (Jin et al., 2014 y 2015; Boucharel et al., 2016abc; Huang et al., 2017).

En lo siguiente, se examinará algunos de los últimos avances relacionados a la comprensión de la conexión entre la dinámica de la capa superior del océano durante eventos ENSO y la modulación de la actividad de los huracanes a escalas de tiempo tanto subestacional como estacional en el Pacífico Central-Oriental. Adicionalmente, se destacará cómo estos avances pueden conducir a mejoras considerables del pronóstico estadístico de la actividad estacional de los TC.

ESCALAS DE TIEMPO ESTACIONAL: ENSO COMO FUENTE DE ENERGÍA PARA LOS HURACANES

Jin et al. (2014) descubrieron un mecanismo dinámico fundamental que tiene un rol, como “combustible”, en la temporada de actividad de los TC en la región CEP que sigue a El Niño. Ellos argumentan que la teoría clásica de la Recarga-Descarga (RD, Jin 1997),

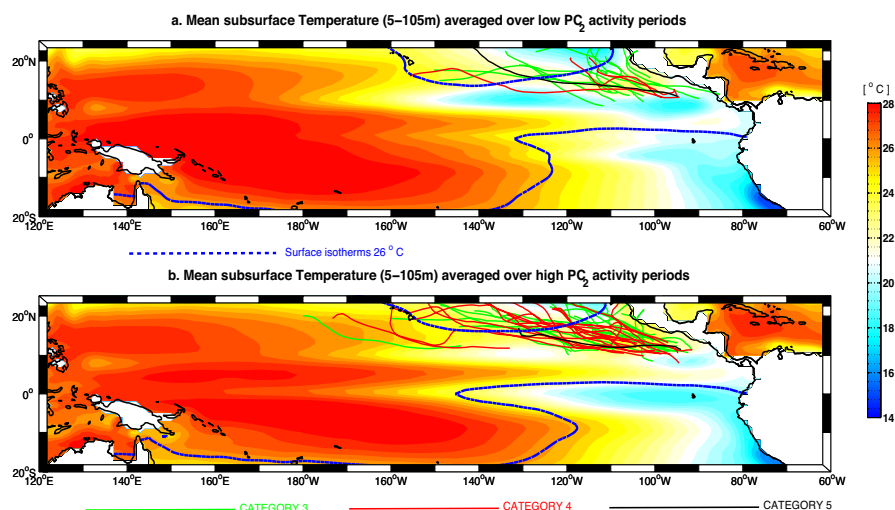


Figura 2. Trayectorias de los mayores Ciclones Tropicales para periodos de alto y bajo contenido de calor subsuperficial in el Pacífico Central-Oriental.

El mecanismo de Recarga-Descarga es descrito por la variabilidad de la segunda componente principal (PC2) de la descomposición, usando Funciones Empíricas Ortogonales (EOF), de las anomalías mensual del contenido de calor subsuperficial (típicamente promediado entre los 80 y 100 metros de profundidad). Durante periodos positivos de la PC2, durante el ENSO, el contenido de calor subsuperficial en invierno (del Hemisferio Norte) es meridionalmente descargado desde el Pacífico Ecuatorial Oriental en la región de los TC y es subsecuentemente disponible luego de 2–3 estaciones en el pico de la época de huracanes como combustible potencial para las tormentas. En el panel (a) los colores indican la media de la temperatura subsuperficial promediada sobre el periodo de baja actividad del PC2 (esto es $PC2 < \text{std}(PC2)$) entre los meses de junio y noviembre. El panel (b) es igual al de (a) pero para alta actividad de PC2 ($PC2 > \text{std}(PC2)$). Las líneas azules gruesas indican la isoterma de 26°C promediada en periodos de baja (a) y alta (b) actividad de la PC2. En cada panel, las líneas de color representan las trayectorias de los mayores TC que ocurrieron el periodo correspondiente. Para la trayectoria de los huracanes, las líneas verdes, rojas y negras representan a los de Categoría 3, 4 y 5, respectivamente (Esta figura es originalmente de Jin et al., 2014).

la cual proporciona una comprensión esencial de la variabilidad de ENSO, es fundamental para controlar las variaciones interanuales de la actividad de los TC en esta región. Este control térmico ocurre por medio de la redistribución meridional de calor subsuperficial que sigue a un evento El Niño. Esto puede, potencialmente, suministrar suficiente energía para que las tormentas se conviertan en huracanes mayores durante la estación de los TC, la cual sigue al pico invernal (Hemisferio Norte) de El Niño. La Figura 2 resume la dinámica encontrada. El mecanismo de RD se describe por la variabilidad de la segunda componente principal (PC2), la cual es obtenida de la descomposición en funciones empíricas ortogonales (EOF) de las anomalías de calor subsuperficiales (típicamente promediadas dentro de los primeros 80 y 100m de profundidad). Durante los períodos altos del PC2, el calor subsuperficial en el invierno boreal en eventos ENSO, se descarga meridionalmente desde el Pacífico oriental ecuatorial hacia la región de los TC, y está disponible durante las siguientes 2 o 3 temporadas, justo en el pico máximo de la temporada de huracanes, para suministrar potencial “combustible” (fuente de calor) a las tormentas (Figura 2b). Este mecanismo diferido juega un papel crucial durante la temporada de huracanes luego de los eventos El Niño canónico o del Pacífico Oriental (EP, por sus siglas en inglés), tal como el evento del 2015/2016, el cual tiene una gran influencia en el EP pero se mantiene aislado después de un evento El Niño del Pacífico Central (CP, por sus siglas en inglés) (Ren y Jin 2013; Jin et al., 2015; Boucharel et al., 2016a). En general, este proceso de suministrar “combustible” a los huracanes explica el 20-40% de la variabilidad de año a año de la actividad de los TC, la cual es diagnosticada por el índice ACE.

En contraste a los ENSO EP, los controles atmosféricos de la actividad de los TC son más dominantes durante la fase de desarrollo y decaimiento de El Niño CP. El desplazamiento hacia el oeste de las anomalías positivas de la TSM asociada a estos eventos induce un movimiento descendente de aire seco en el Pacífico Oriental y la supresión de la actividad de los TC en el CEP durante el desarrollo de El Niño (Kim et al., 2011). La temporada de los TC, cuando sigue al pico de El Niño CP, es cercana a lo normal debido a un efecto compensatorio relacionado al bajo contenido de calor y la reducida cizalladura del viento (Boucharel et al., 2016a).

ESCALAS DE TIEMPO SUBESTACIONAL: LA INFLUENCIA DE LAS ONDAS KELVIN OCEÁNICAS.

La actividad de los TC en estas escalas de tiempo pueden ser atribuidas a cambios en los factores ambientales relacionadas a las Oscilaciones de Madden-Julian (MJO; Madden and Julian, 1994). Algunos estudios previos señalan un link entre las

ondas Kelvin atmosféricas intraestacionales, la MJO y la modulación de la actividad de los TC en el CEP y, en particular, la probabilidad de la ciclogénesis. (Molinari et al., 1997; Maloney and Hartmann, 1998 y 2000a; Ayyer y Molinari, 2008; Jiang et al., 2012). Los eventos MJO han sido propuestos como mecanismos desencadenadores para la propagación hacia el este de ondas Kelvin atmosféricas, las que intensifican la convección y refuerzan, en estas escalas de tiempo, las anomalías zonales de viento del oeste sobre la región CEP, la cual, finalmente, resulta en una amplificación de la vorticidad que es favorable para la génesis de los TC. En general, las fases convectivamente activas de la variabilidad intraestacional puede incrementar la frecuencia de la ciclogénesis hasta en cuatro veces (Barrett and Leslie, 2009). Se sabe que aún la predictibilidad intrínseca de la MJO y variabilidad intraestacional, en general, está limitada a algunas semanas (Waliser, 2006; Vitart, 2009; Kim et al., 2014), por lo cual no es tan útil para pronosticar la actividad de los TC con mucha antelación. Por otro lado, la variabilidad atmosférica, como las MJO, generan ondas Kelvin oceánicas ecuatoriales (EKW) subanuales e intraestacionales, las cuales participan en el proceso de crecimiento de El Niño, además modulan la intensidad de los huracanes en el CEP en escalas de tiempo estacional y mensual (Boucharel et al., 2016b). Estas ondas oceánicas son una característica importante en la dinámica del Pacífico Tropical en una variedad de escalas de tiempo porque transfiere de forma rápida (en algunos meses) y eficientemente la variabilidad desde el extremo occidental al oriental de la cuenca del Pacífico. A pesar de los complejos mecanismos atmosféricos así como de acoplamiento que “gatillan” las EKW (Puy et al., 2015), cuya dinámica es relativamente bien comprendida, estas son muy bien monitorizadas por medio de observaciones satelitales. A pesar que existe disipación a través de su trayectoria, estas ondas oceánicas tienen una señal marcada en la capa superior del océano (profundidad de la termoclina y contenido de calor), en particular en la región CEP y durante la estación (temporada) boreal de los TC. La Figura 3 (de Boucharel et al., 2016b) muestra la propagación de la correlación significativa entre las series de tiempo mensual de las anomalías de la profundidad de la termoclina y la señal de la ACE que no está relacionada a la influencia del ENSO y tiene la forma de ondas: Kelvin subanual, atrapada a la costa y Rossby. Como se puede ver en la figura, esta señal se origina en el Pacífico Central-Occidental durante el invierno boreal (Figura 3a-d) y alcanza la región de la “Lengua Fría” (región de afloramiento ecuatorial) en mayo (Figura 3e), que es el inicio de la temporada de los TC. Entonces, esta relación coherente entre la profundidad de la termoclina y la intensidad de los huracanes empieza a esparcirse hacia los polos a lo largo de las costas americanas (Figura 3f y g) y es subsecuentemente irradiado hacia el oeste cubriendo la región CEP durante la temporada de huracanes. De la misma forma en que el ENSO influye, remota y retardadamente por medio de la descarga de calor, en

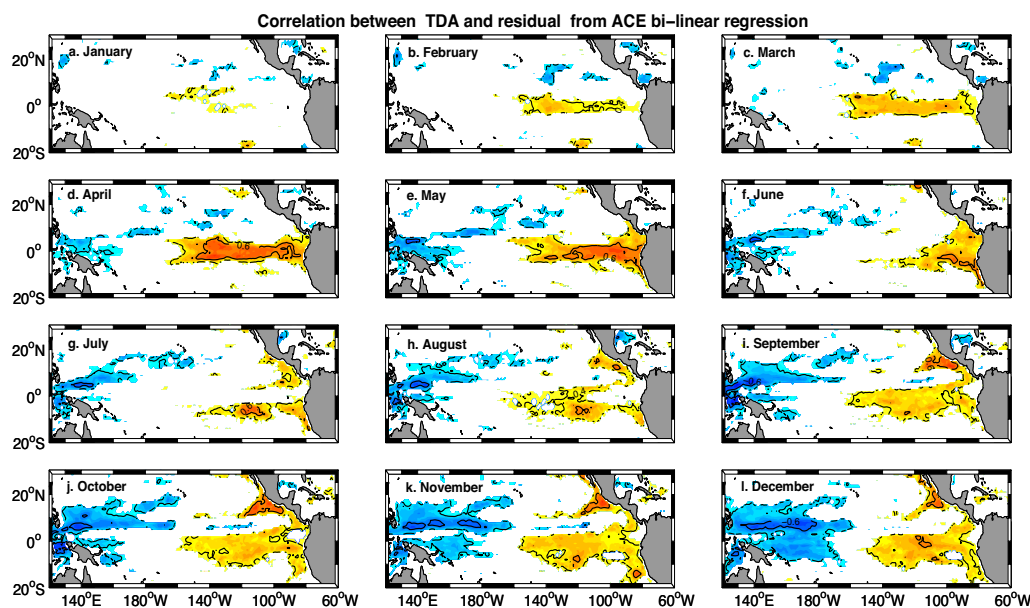


Figura 3. Correlación significativa, a un nivel de confianza del 93%, entre las anomalías anuales de la profundidad de la termoclina (TDA), de cada mes del calendario desde enero (a) hasta diciembre (l), y el residual anual de la regresión bilineal de la ACE en Niño 3.4 y el índice T_{sub} [que representa las anomalías mensuales de temperatura promediadas en la región de TC (5–25°N, 160–90°W), entre 5 y 80 m de profundidad, y durante la temporada de huracanes (May–Nov)]. Los contornos son cada 0.2. (Figura original de Boucharel et al., 2016b).

la actividad de los TC a escala estacional, estas EKW subanuales ejercen un fuerte control en la intensidad de los huracanes y su variación anual (explicación de hasta el 30% del residual ACE, es decir, el 15% de la actividad estacional total de los TC). La escala de tiempo involucrada en esta propagación ondulatoria permite anticipar su influencia en la variabilidad de la capa superior del océano y en la actividad de las tormentas con algunos meses de anticipación, ofreciendo de este modo un tiempo considerable para predecir una fracción sustancial de la actividad estacional de los TC.

El uso de los productos diarios de la profundidad de la termoclina permitió, además, que Boucharel et al. (2016b) investigaran el impacto de la variabilidad de alta frecuencia en el océano superior sobre la actividad de los huracanes en la CEP. Ellos resaltan el fuerte potencial de pronóstico de la actividad de los TC en escalas de tiempo estacional y subestacional, por medio de las EKW subanuales e intraestacionales, respectivamente.

PRONÓSTICOS ESTADÍSTICOS DE LA ACTIVIDAD DE LOS HURACANES

De manera oportuna, uno de los El Niño EP más fuerte que la historia ha registrado ocurrió durante el invierno (del Hemisferio Norte) del 2015/2016 (Jacox et al., 2016) y brindó una oportunidad temprana para comprobar el mecanismo que alimenta la intensidad de los huracanes propuesto por Jin et al. (2014). Boucharel et al. (2016c) construyeron un modelo de pronóstico simple de regresión multi-lineal de los dos primeros

EOF obtenidos de la variabilidad, año a año, de ACE. El primer modo, más activo durante la última parte de la temporada de TC (septiembre-noviembre), está vinculado a El Niño EP, principalmente a través del mecanismo de Jin et al. (2014) para los huracanes. El segundo modo, el cual domina durante la temporada inicial, está relacionado con El Niño CP y a los cambios asociados a la variabilidad atmosférica. Boucharel et al. (2016c) evaluaron además que el estado subsuperficial durante el invierno del Hemisferio Norte en la región del Pacífico ecuatorial oriental (caracterizado por la descarga térmica del ENSO y el mecanismo de intensificación de los huracanes), la inclinación este-oeste de la termoclina (que describe la fase de transición del ENSO) y las condiciones anómalas de la superficie del océano en la región de TC durante la primavera del Hemisferio Norte (representando los cambios atmosféricos inducidos por la persistencia de las anomalías de TSM locales), son buenos predictores dinámicos independientes de estos dos modos dominantes de la variabilidad de la actividad TC. Los resultados de este modelo estadístico muestran que el mecanismo que “alimenta” la intensificación de los huracanes conduce claramente a una temporada de TC más activa, posterior a El Niño 2016, y supera las condiciones atmosféricas desfavorables relacionadas a la transición del ENSO hacia La Niña. A diferencia de la perspectiva de la NOAA (a finales de mayo), que no tiene en cuenta el mecanismo de abastecimiento de energía propuesto, y que indicó una temporada promedio de TC, este simple modelo predijo en marzo, con éxito, una intensa temporada de huracanes del año 2016.

Adicionalmente, la metodología adoptada en Jin et al. (2014) y Boucharel et al. (2016b,c) permite derivar nuevos y revolucionarios productos espaciales de información de peligros. En estos estudios, a partir de

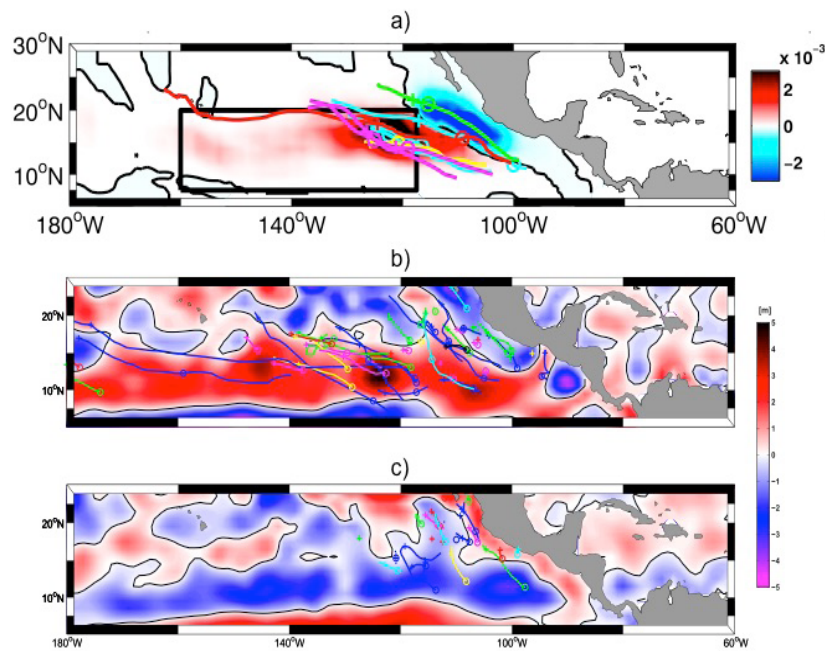


Figura 4. (a) Reconstrucción de las anomalías normalizadas de ACE durante la temporada de TC para el año 2016 (junio-noviembre) obtenidas del pronóstico de los PC's (de Boucharel et al., 2016c). (b) Compuesto de la anomalía de la profundidad de la termoclina (m) reconstruida de los tres primeros CEOF (EOF Complejos) promediados sobre la fase de hundimiento de la onda Rossby (mayo-agosto). (c) Igual que (b) pero para la fase de afloramiento de la onda Rossby (setiembre-noviembre). Las manchas rojas (magentas) representan una termoclina anormalmente profunda (superficial) (de Boucharel et al 2016b). Líneas coloreadas muestran trayectorias de los TC que ocurrieron en junio/julio de 2016: cian para tormentas tropicales y, para los huracanes, verde para Categoría 1, Amarillo para Categoría 2, rojo para Categoría 3 y magenta para Categoría 4. Los círculos indican la máxima intensificación de los vientos durante cada tiempo de vida de las tormentas y las cruces la localización en donde se alcanza la máxima velocidad del viento.

un análisis estadístico de EOF, se infiere un índice de actividad de los huracanes o un mecanismo dinámico relacionado con la variabilidad de huracanes en la región CEP. Los correspondientes componentes principales (PCs) que son pronosticados se pueden proyectar en patrones espaciales EOF fijos. Por ejemplo, Boucharel et al. (2016c) proyectaron los PCs pronosticados del ACE, para el año 2016, en sus patrones respectivos y reconstruyeron el campo de la anomalía estacional bidimensional del ACE que está asociado con los modos dominantes de la actividad de los TC (Figura 4a). Los resultados indicaron con precisión que la temporada 2016 sería más (menos) activa en el Pacífico Central (Este), con la posibilidad de que fuertes huracanes lleguen más al oeste hacia Hawaii. Asimismo, la distribución espacial de las trayectorias de los huracanes, en el periodo 2012-2015, tiende a coincidir con el campo de anomalías intraestacionales de la profundidad de la termoclina proyectada en el patrón EOF de la amplitud de la EKW (Boucharel et al., 2016b). Una termoclina más profunda, relacionada a la fase de la onda Kelvin ecuatorial o Rossby de hundimiento (*downwelling*), parece indicar un camino oceánico para el fortalecimiento de los huracanes, ya que ofrece agua subsuperficial más caliente (Figura 4c). Por otro lado, una termoclina más somera tiende a inhibir el desarrollo de los TC (Figura 4c).

CONCLUSIONES

A pesar que el control de la actividad de los huracanes por la dinámica de la parte superior del océano es un

campo de investigación bastante nuevo, este ya ha proporcionado información muy importante sobre los mecanismos que controlan la modulación de la actividad de TC en escalas de tiempo estacionales y subestacionales. En particular, la termoclina poco profunda y la fuerte estratificación del CEP hacen que esta región de desarrollo de los huracanes sea considerablemente sensible a la variabilidad del océano tropical vinculada a ENSO y MJO (es decir, EKW). Sin embargo, a pesar de estas perspectivas prometedoras, la comunidad encargada de los pronósticos de TC aún tiene que incluir, en sus esquemas de predicción, los precursores relacionados con esta dinámica altamente predecible. Esto puede explicar, en parte, el *skill* limitado de los pronósticos estacionales en esta región en la actualidad.

REFERENCIAS

- Aiyyer, A., and J. Molinari, MJO and Tropical Cyclogenesis in the Gulf of Mexico and Eastern Pacific: Case Study and Idealized Numerical Modeling. *J. Atmos. Sci.*, 65, 2691–2704, (2008).
- Balaguru, K., P. Chang, R. Saravanan, L. R. Leung, Z. Xu, M. Li, and J. S. Hsieh. Ocean barrier layers' effect on tropical cyclone intensification, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 109(36), 14,343–14,347, (2012).
- Balaguru, K., R.L. Leung, and J.-H. Yoon, Oceanic control of northeast Pacific hurricane activity at interannual timescales. *Environ. Res. Lett.* 8, 044009, (2013).

- Barrett, B.S., and L.M. Leslie, Links between Tropical Cyclone Activity and Madden-Julian Oscillation Phase in the North Atlantic and Northeast Pacific Basins. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 727-744, (2009).
- Bell, G.D., M.S. Halpert, R.C. Schnell, R.W. Higgins, J. Lawrimore, V.E. Kousky, R. Tinker, W. Thiaw, M. Chelliah, and A. Artusa, Climate assessment for 1999. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 81, S1-S50, (2000).
- Boucharel, J., A. Timmermann, A. Santoso, M.H. England, F.-F. Jin, and M.A. Balmaseda, A surface layer variance heat budget for ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 3529–3537, doi:10.1002/2015GL063843, (2015).
- Boucharel, J., F.-F. Jin, I.-I. Lin, S.-C. Huang, and M. H. England. Different Control of Tropical Cyclone Activity in the Eastern Pacific for two types of El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL067728, (2016a).
- Boucharel, J., F.-F. Jin, M.E. England, B. Dewitte, I.-I. Lin, S.-C. Huang, and M.A. Balmaseda. Influence of intraseasonal oceanic Kelvin waves on the Eastern Pacific hurricane activity. *J. Climate*, doi:10.1175/JCLI-D-16-0112.1y, (2016b).
- Boucharel, J., F.-F. Jin, M.E. England, and I.-I. Lin. Modes of hurricane activity variability in the Eastern Pacific: implications for the 2016 season. *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL070847, (2016c).
- Camargo, S.J., K.A. Emanuel, and A.H. Sobel, Use of a genesis potential index to diagnose ENSO effects on tropical cyclone genesis. *J. Climate*, 20, 4819-4834, (2007a).
- Camargo, S.J., Sobel, A.H., Barnston, A.G. & Ghil, M. Clustering of eastern north Pacific tropical cyclone tracks: ENSO and MJO effects. *Geophys. Res. Lett.*, 9, Q06V05, (2008).
- Camargo, S.J., A.H. Sobel, A.G. Barnston, and P.J. Klotzback, The influence of natural climate variability on tropical cyclones, and seasonal forecasts of tropical cyclone activity. *Global Perspectives on Tropical Cyclones: From Science to Mitigation* (World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate vol. 4) ed. J C L Chan and J D Kepert (Singapore: World Scientific) pp 325–60, (2010).
- Chu, P.S. and J. Wang, Tropical cyclone occurrences in the vicinity of Hawaii: are the differences between El Niño and non-El Niño years significant? *J. Climate*, 10, 2683–2689, (1997).
- Chu, P.S., and X. Zhao, A Bayesian regression approach for predicting seasonal tropical cyclone activity over the Central North Pacific. *J. Climate*, 20, 4002-4013, (2007).
- Collins, J.M. and I.M. Mason, Local environmental conditions related to seasonal tropical cyclone activity in the northeast Pacific basin. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3881–3884, (2000).
- Collins, J.M. The relationship of ENSO and relative humidity to interannual variations of hurricane frequency in the north-east Pacific Ocean. *Pap. Appl. Geogr. Conf.*, 30, 324–333, (2007).
- Court, A., Tropical Cyclone Effects on California. National Oceanic and Atmospheric Administration Tech. Memo, NWS WR-159, (1980).
- Dong, K., and G.J. Holland, A global view of the relationships between ENSO and tropical cyclone frequencies. *Acta Met. Sin.*, 8, 19–29, (1994).
- Englehart, P.J., and A.V. Douglas, The role of eastern North Pacific tropical storms in rainfall climatology of western Mexico. *Int. J. Climatol.*, 21, 1357-1370, (2001).
- Gray, W.M., and J.D. Sheaffer, El Niño and QBO influences on tropical cyclone activity, in *Teleconnections linking worldwide anomalies*. M.H. Glanz, R.W. Katz, and N. Nicholls, eds., pp. 257–284, Cambridge University Press, New York, (1991).
- Huang, S.-C., J. Boucharel, I.-I. Lin, I.F. Pun, and F.-F. Jin. Air-sea fluxes for Hurricane Patricia (2015): Comparison with super typhoon Haiyan (2013) and for different ENSO conditions. *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, doi:10.1002/2017JC012741, (2017).
- Irwin, R.P., and R. Davis, The relationship between the southern oscillation index and tropical cyclone tracks in the eastern North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2251–2254, (1999).
- Jacox, M. G., E. L. Hazen, K. D. Zaba, D. L. Rudnick, C. A. Edwards, A. M. Moore, and S. J. Bograd, Impacts of the 2015–2016 El Niño on the California Current System: Early assessment and comparison to past events, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7072–7080, doi:10.1002/2016GL069716, (2016).
- Jauregui, E., Climatology of landfalling hurricanes and tropical storms in Mexico. *Atmosfera*, 16 (4), 193–204, (2003).
- Jiang, X., M. Zhao, and D.E. Waliser, Modulation of tropical cyclones over the eastern Pacific by intraseasonal variability simulated in an AGCM. *J. Climate*, 25, 6524–6538, (2012).
- Jin, F.-F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: conceptual model. *J. Atmos. Sci.*, 54, 811–829, (1997).
- Jin, F.-F., J. Boucharel, and I.I. Lin, Eastern Pacific Tropical Cyclones intensified by El Niño delivery of subsurface ocean heat, *Nature*, 516, 82–85, (2014).

- Jin, F.-F., J. Boucharel, and I.I. Lin, Reply to Moon, I.J., Kim, S.H. & Wang, C. *Nature*, 526, <http://dx.doi.org/10.1038/>, (2015).
- Kim, H.M., P.J. Webster, and J.A. Curry, Modulation of North Pacific tropical cyclone activity by three phases of ENSO. *J. Climate*, 24, 1839–1849, (2011).
- Kim, H.M., P.J. Webster, V.E. Toma, and D. Kim, Predictability and Prediction Skill of the MJO in Two Operational Forecasting Systems. *J. Climate*, 27, 5364–5378, (2014).
- Kimberlain, T.B., The effects of ENSO on North Pacific and North Atlantic tropical cyclone activity, in Proc. 23rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Dallas, TX, AMS, Boston, (1999).
- Lin, I.I., C.C. Wu, I.F. Pun, and D.S. Ko, Upper Ocean Thermal Structure and the Western North Pacific Category-5 Typhoons, Part I: Ocean Features and Category-5 Typhoon's Intensification, *Mon. Wea. Rev.*, 136, 3288–3306, (2008).
- Lin, I.I., P. Black, J.F. Price, C.-Y. Yang, S.S. Chen, C.-C. Lien, P. Harr, N.-H. Chi, C.-C. Wu, and E. A. D'Asaro, An ocean coupling potential intensity index for tropical cyclones, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1878–1882, doi:10.1002/grl.50091, (2013).
- Lin, I.I., G.J. Goni, J.A. Knaff, C. Forbes, and M.M. Ali, Ocean heat content for tropical cyclone intensity forecasting and its impact on storm surge, *Natural Hazards*, 66, 1481–1500, (2013b).
- Madden, R.A., and P.R. Julian, Observations of the 40–50 day tropical oscillation—A review. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 814–837, (1994).
- Maloney, E.D., and D.L. Hartmann, Frictional moisture convergence in a composite life cycle of the Madden–Julian oscillation. *J. Climate*, 11, 2387–2403, (1998).
- Maloney, E.D., and D.L. Hartmann, Modulation of Eastern North Pacific hurricanes by the Madden–Julian oscillation. *J. Climate*, 13, 1451–1460, (2000a).
- McPhaden, M. J., et al., The Tropical Ocean–Global Atmosphere (TOGA) observing system: A decade of progress, *J. Geophys. Res.*, 103(14), 169–240, (1998).
- Molinari, J., D. Knight, M. Dickinson, D. Vollaro, and S. Skubis, Potential vorticity, east-erly waves, and eastern Pacific tropical cyclo-genesis. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 2699–2708, (1997).
- Neumann, C.J. Global overview in Global guide to tropical cyclone forecasting, edited by G. J. Holland, 1.1–1.56. Technical Document WMO/TC-No. 560, Report No. TCP-31. Geneva: World Meteorological Organization, (1993).
- Peduzzi, P.B., B. Chatenoux, H. Dao, A. De Bono, C. Herold, J. Kossin, F. Mouton, and O. Nordbeck, Global trends in tropical cyclone risk. *Nature Climate Change*, 2, 289–294, (2012).
- Puy, M., J. Vialard, M. Lengaigne, and E. Guilyardi, Modulation of equatorial Pacific westerly/easterly wind events by the Madden-Julian oscillation and convectively-coupled Rossby waves. *Clim. Dynam.*, doi:10.1007/s00382-015-2695-x, (2015).
- Raga, G.B. Bracamontes-Ceballos, L.M. Farfan, and R. Romero-Centeno, Landfalling tropical cyclones on the Pacific coast of Mexico: 1850–2010. *Atmósfera*, 26(2), 209–220, (2013).
- Ren, H.L., and F-F Jin, Recharge Oscillator Mechanisms in Two Types of ENSO. *J. Climate*, 26, 6506–6523, (2013).
- Ritchie, E.A., K.M. Wood, D.S. Gutzler, and S. R. White, The Influence of Eastern Pacific Tropical Cyclone Remnants on the Southwestern United States. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 192–210, (2011).
- Toma, V. and P.J. Webster, Oscillations of the intertropical convergence zone and the genesis of easterly waves. Part I: diagnostics and theory. *Clim. Dyn.*, 34, 587–604, (2010).
- Vincent E.M., K.A. Emanuel, M. Lengaigne, J. Vialard, and G. Madec, Influence of upper-ocean stratification interannual variability on Tropical Cyclones. *J. Adv. Model. Earth Syst*, 6, 680–699, doi:10.1002/2014MS00032, (2014).
- Vitart, F., Impact of the Madden Julian Oscillation on tropical storms and risk of landfall in the ECMWF forecast system. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15802, doi:10.1029/2009GL039089, (2009).
- Wang, C., and S. Lee, Co-variability of tropical cyclones in the north Atlantic and the eastern North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L24702, (2009).
- Waliser, D.E., Predictability of tropical intraseasonal variability. Predictability of weather and climate, T. Palmer and R. Hagedorn, Eds., Cambridge University Press, 275–365, (2006).
- Wood K.M., and E.A. Ritchie, An Updated Climatology of Tropical Cyclone Impacts on the Southwestern United States. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 4322–4336, (2013).
- Wu, P., and P.S. Chu, Characteristics of tropical cyclone activity over the eastern North Pacific: The extremely active 1992 and the inactive 1977. *Tellus*, 59A, 444–454, (2007).