

Una revisión sobre los Sistemas de Afloramiento de Bordes Orientales: diversidad, dinámica acoplada y sensibilidad al cambio climático



Dra. Ivonne Montes
INVESTIGADORA CIENTÍFICA DEL INSTITUTO
GEOFÍSICO DEL PERÚ

Doctora en Oceanografía de la Universidad de Concepción (Chile) y Licenciada en Física de la Universidad Nacional del Callao. Desde el 2014, es investigadora científica en el IGP en donde uno de sus primeros objetivos fue conducir un proyecto para implementar un sistema de computación de alto rendimiento que, actualmente, forma parte del Laboratorio de Dinámica de Flúidos Geofísicos Computacional del IGP, el cual está disponible para toda la comunidad científica. Es autora de varios artículos científicos y sus estudios están enfocados en entender el rol del océano sobre el clima y los procesos asociados al Cambio climático (tal como la desoxigenación).



Dr. Ruben Escribano
DIRECTOR ALTERNO EN
EL INSTITUTO MILENIO DE
OCEANOGRAFÍA (IMO)

Las regiones localizadas en los bordes orientales de los océanos del mundo, conocidas como EBUS (Eastern boundary upwelling systems, Figura 1), se caracterizan por manifestar una serie de procesos dinámicos complejos que abarcan una amplia gama de escalas espaciales y temporales debido al fuerte acoplamiento entre el océano, la atmósfera y el continente. Asimismo, las regiones identificadas dentro de este grupo (la costa oeste de América del Norte y del Sur, Sudoeste de África y Noroeste de África/Ibérica) se encuentran entre los ecosistemas

marinos de mayor productividad biológica del mundo (por ejemplo, Pauly and Christensen, 1995), los cuales sustentan algunas de las principales pesquerías mundiales, a pesar de que ocupan tan solo el 1% de la superficie de los océanos del mundo. Esto se debe principalmente a la interacción aire-mar que se activa cuando los vientos alisios del sudeste, que soplan constantemente hacia el ecuador a lo largo de la costa, desplazan las capas superficiales del océano y, por conservación de masa y para restablecer el equilibrio geostrófico en las fronteras orientales, afloran aguas

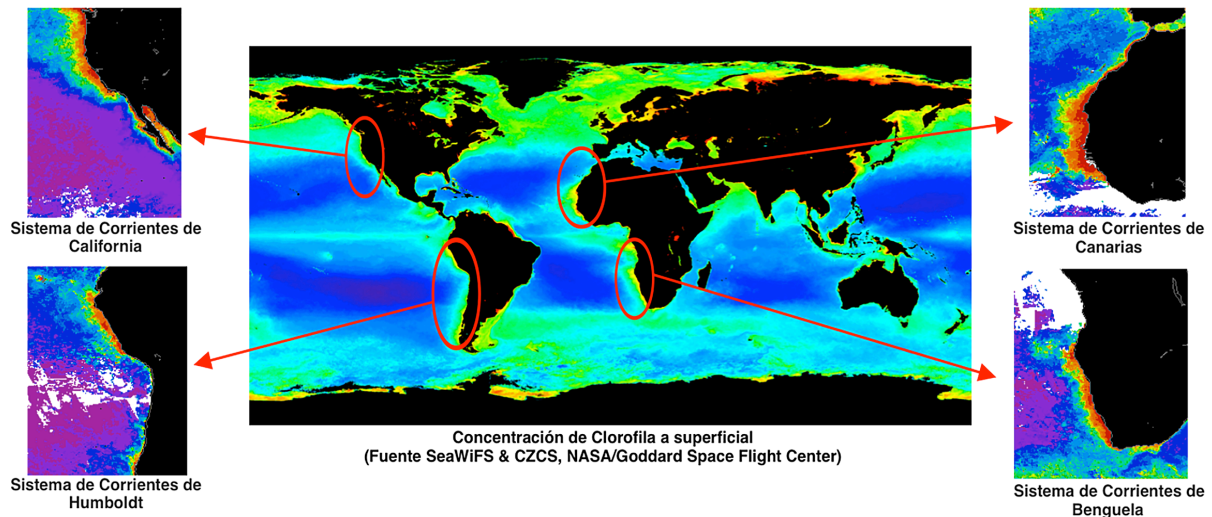


Figura 1. Concentración de Clorofila extraída de los datos satelitales SeaWiFS. Los recuadros destacan las áreas definidas como Sistemas de Afloramiento de Bordes Orientales (EBUS por sus siglas en inglés).

más profundas (frías y ricas en nutrientes, Figura 2) a condiciones favorables de luz las que sostienen el crecimiento del fitoplancton y determinan, finalmente, el clima de la región.

En estas áreas (Sistemas de Corrientes de California, Humboldt, Benguela y Canarias) también se desarrollan o identifican procesos físicos tales como: corrientes superficiales lentas a lo largo de la costa, corrientes subsuperficiales hacia el polo, filamentos, chorros, remolinos de mesoescala y ondas internas, que también son impulsadas, activadas y moduladas por la respuesta del viento que va de una escala local a regional (por ejemplo, Chelton et al., 2007). Estos procesos interactúan en diferentes escalas de tiempo, enriqueciendo así la dinámica del afloramiento costero que, al mismo tiempo, influyen en la producción pesquera marina (tamaño de células de fitoplancton (por ejemplo, Van der Lingen et al., 2009), en el plancton y la estructura de la comunidad de peces (por ejemplo, Van del Lingen et al., 2006) y en los ciclos biogeoquímicos (por ejemplo, Woodson y Litvin, 2015). Localmente, la circulación atmosférica de nivel bajo también puede verse afectada por las interacciones aire-mar-tierra, lo que puede afectar el afloramiento, la productividad y el clima.

La combinación de la circulación lenta y la alta productividad biológica en la capa superficial impulsa tasas elevadas de descomposición de la materia orgánica y el consumo de oxígeno disuelto, lo que resulta en el desarrollo de las denominadas Zonas Mínimas de Oxígeno (OMZ, por ejemplo, Breitburg et al., 2018). Las cuatro EBUS muestran niveles variables en el desarrollo de las OMZs (Figura 2) que van desde el sistema *anóxico* somero de Perú-Chile al sistema *hipóxico* más profundo de California (Chavez y Messié, 2009). Las áreas con bajo nivel de oxígeno son críticas para los macroorganismos que no pueden sobrevivir en condiciones pobres de oxígeno. Los eventos *anóxicos* extremos pueden tener serios impactos, ya sea a través de la estructuración o reducción del hábitat (por ejemplo, en la región del sistema de corrientes de Humboldt que muestra una

capa habitable poco profunda lo cual tiene consecuencias sobre la capacidad de captura) o sobre la mortalidad, y que ocasionalmente se manifiesta con mortandades masivas de peces, crustáceos y moluscos en la zona costera. También se producen procesos biogeoquímicos específicos a bajas concentraciones de oxígeno que influyen en los ciclos globales de los nutrientes del océano y en las condiciones químicas de aguas superficiales, así como en la producción de gases de efecto invernadero (por ejemplo, Stramma et al., 2010). Sobre esto último, cuando las aguas ascienden hacia la superficie liberan CO_2 y N_2O (potentes gases de efecto invernadero) hacia la atmósfera, los cuales pueden impactar la química atmosférica, el clima y tener una retroalimentación positiva con el calentamiento global. Asimismo, la sobresaturación de CO_2 en aguas superficiales también genera condiciones de mayor acidez.

Los mecanismos básicos de forzamiento son similares en las diferentes EBUS y establecen similitudes en la dinámica física esencial así como en la estructura del ecosistema, y hasta la fecha se han logrado avances en la comprensión de la dinámica de la EBUS desde una perspectiva integradora y comparativa (por ejemplo, Pegliasco et al., 2015; Capet et al., 2014; Lackar y Gruber, 2012; Gruber et al., 2011; Chavez and Messie, 2009; Capet et al., 2008; Carr and Kearns, 2003). Sin embargo, aún quedan muchas dudas sobre los procesos específicos asociados con las EBUS individualmente (como el caso de la solidez de la teleconexión ecuatorial) y su sensibilidad al cambio climático (por ejemplo, Wang et al., 2015; Bakun et al., 2015; Mackas et al., 2006). Por ejemplo, el sector peruano del sistema de Humboldt es una de las EBUS más productivas, aunque experimenta las mayores fluctuaciones en escalas de tiempo interanual (es decir, El Niño) en comparación con los otras EBUS.

En la EBUS del Océano Índico, el sistema de surgencia Sumatra-Java está relativamente menos estudiada, aunque juega un papel importante en el desarrollo del Dipolo del Océano Índico (Saji et al., 1999). La

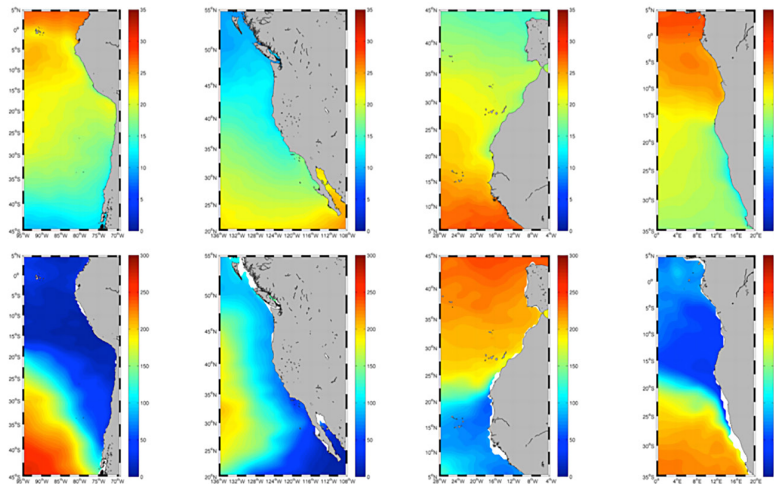


Figura 2. Promedio anual de la Temperatura superficial del mar (arriba) y concentración de oxígeno a 300m (abajo) para cada Sistema de Afloramiento de Bordes Orientales extraído de la base de datos CARS (CSIRO Atlas Regional Seas).

diferencia en sus posiciones latitudinales (Figura 1) implica que algunas EBUS o subcomponentes de las EBUS son más manejados/impulsados por el viento (los de latitudes altas) mientras que otros experimentan más teleconexiones oceánicas tropicales, aunque la EBUS de Benguela también está influenciada por parte de la corriente de Agulhas. Por lo tanto, si bien los puntos comunes en la naturaleza del forzamiento han sugerido que se podría plantear una teoría común de la circulación y su papel en las propiedades biogeoquímicas (por ejemplo, OMZ), las características actuales del forzamiento (amplitud, frecuencia, persistencia, asimetría) vinculadas a las no-linealidades inherentes de los sistemas requieren una revisión de este paradigma.

Además, el progreso en el modelado numérico regional ha dado luces sobre los procesos potencialmente importantes que solo se infirieron hasta hace poco, por ejemplo, el efecto de la disminución del viento en la dinámica del afloramiento (Capet et al., 2004; Renault et al., 2015, 2016); acoplamiento viento-corriente (Chelton et al., 2007); transporte inducido por remolinos (Bettencourt et al., 2015; Vergara et al., 2016; Gruber et al., 2011; Rossi et al., 2008) y que son, hasta ahora, difíciles de abordar solo con observaciones o con modelos globales. Estos últimos, en particular, siguen sufriendo sesgos cálidos persistentes (Richter, 2015; Zuidema et al., 2016) que han limitado la capacidad predictiva de la evolución de las EBUS en diversas escalas de tiempo (desde intraestacional pasando por decadal y más) (Cabré et al., 2015; Stramma et al., 2012). Aunque la mayoría de los estudios de modelado regional se han orientado a los procesos, se están haciendo algunas simulaciones de *hindcast* regionales a largo plazo (Dewitte et al., 2012; Franks et al., 2013; Combes et al., 2015) y las simulaciones de modelos regionales, con datos asimilados, han sido puestas a disposición de la comunidad científica (Neveu et al., 2016). Aunque aún no incluyen todos los procesos relevantes (por ejemplo, el acoplamiento aire-mar en la mesoescala) y en su mayoría están limitados al componente físico del sistema, sin

embargo, los resultados de los modelos permiten la investigación de procesos en escalas de tiempo de baja frecuencia y dentro de un marco climático deseado, superando algunos de las limitaciones de los estudios observacionales y de modelado basados en modelos globales de baja resolución. Hasta ahora, la atención se ha centrado en las cuatro principales EBUS (California, Canary, Humboldt, Benguela) sin embargo, también es interesante contrastar las EBUS con los sistemas de afloramiento de bordes orientales débiles y menos productivos, como los sistemas de Corriente Ibérica y Corriente de Leeuwin, para comprender mejor los procesos transitorios en el contexto del calentamiento global.

Esto ha estimulado en los últimos años una serie de esfuerzos individuales para comprender la dinámica de las EBUS desde una perspectiva observacional, por ejemplo, el programa internacional CLIVAR 'VOCALS' (VAMOS Ocean-Cloud-Atmosphere-Land Study) implementado para desarrollar y promover actividades científicas que conduzcan a una mejor comprensión del sistema acoplado océano-atmósfera del Pacífico suroriental, desde escalas de tiempo diurno a interanual. El proyecto *transdisciplinario* AMOP (Actividades de investigación dedicadas a la Zona Mínima de Oxígeno en el Pacífico oriental) se lanzó para investigar los mecanismos que conducen a la formación de la existencia de OMZ en el Perú y su variabilidad en las escalas de tiempo que van desde horas hasta centenarias. La iniciativa alemana SFB754 "Interacciones entre clima y biogeoquímica en el océano tropical" abordó la amenaza recientemente reconocida de la desoxigenación de los océanos, su posible impacto en las OMZs tropicales y sus implicancias para el sistema global clima-biogeoquímica. El proyecto recientemente iniciado TPOS2020 (<http://tpos2020.org/>) tiene como objetivo diseñar un futuro sistema de observación en el Pacífico tropical que incluya el monitoreo del borde oriental y el tratamiento de la dinámica de surgencias costeras (Takahashi et al., 2014). Un enfoque de investigación CLIVAR/SOLAS/IMBER sobre sistemas de

afloramiento también se ha iniciado recientemente con el objetivo de avanzar en la comprensión de la dinámica de las EBUS desde la física hasta la pesca.

Estos programas de observación, junto con el progreso reciente en el modelado regional acoplado, ofrecen una nueva perspectiva para comprender las EBUS que pueden revitalizar el enfoque de intercomparación. En particular, la perspectiva de las simulaciones regionales a largo plazo (no solo climatológicas) es una ventaja para abordar las interacciones a escala temporal y espacial (procesos de mejora de escala, rectificación) y su sensibilidad a los cambios de baja frecuencia en las condiciones ambientales, proporcionando material para revisar la interpretación de datos históricos. El esfuerzo internacional en curso para intensificar los sistemas de observación oceánica (por ejemplo, Argo, IOCCP, misión SWOT, misiones Sentinel), que permita abordar pequeñas escalas espaciales de variabilidad, también establece condiciones favorables para documentar cuantitativamente el continuo de escalas pequeñas (desde mesoescala a submesoescala) y su impacto en la dinámica del ecosistema.

En resumen, hay varios procesos regionales en las EBUS que los estudios con modelos numéricos sugieren que son importantes, pero que no han sido documentados por las observaciones (por ejemplo, impactos de los jets atmosféricos de mesoescala costeros, transporte de propiedades del agua por remolinos intra-termoclinos, jets zonales oceánicos profundos, interacciones aire-mar, etc.). Esto requiere evaluaciones más cuantitativas del rol de dichos procesos en la dinámica de las EBUS, ya sea desde plataformas de modelado integrado, es decir, que tengan en cuenta las retroalimentaciones complejas y las interacciones de escalas (espaciales y temporales), y operen desde una perspectiva climática, es decir, a partir de simulaciones a largo plazo (multidecadales). La importancia socioeconómica de las EBUS (ocupan 1% del área oceánica mundial que sostiene el 20% de las capturas de peces del mundo) motiva aún más a investigar el rol de estos procesos regionales en la biogeoquímica de las OMZ. Este es un requisito previo para mejorar las capacidades predictivas de la evolución de los ecosistemas marinos en estas regiones económicas claves, y anticipar cambios en la naturaleza de eventos extremos (por ejemplo, *hipoxia*).

Por tanto, reconociendo que las EBUS son laboratorios naturales para estudiar la amplitud de los procesos interactivos entre la tierra, el océano y la atmósfera a escala regional, en el 2018 nace el grupo de trabajo 155 de SCOR (Scientific Committee on Oceanic Research, http://www.scor-int.org/SCOR_WGs.htm, identificado por sus siglas en inglés como SCOR WG 155). El SCOR WG 155, denominado "*Eastern boundary upwelling systems (EBUS): diversity, coupled dynamics and sensitivity to climate change*", tiene como objetivo la integración del conocimiento existente sobre las EBUS para formular un documento técnico de recomendaciones estratégicas para establecer sistemas

regionales de observación y enfoques de modelado climático que monitoree y comprenda las interacciones físicas y biogeoquímicas océano-atmósfera. Estos sistemas de observación serán fundamentales para mejorar el rendimiento y la confiabilidad de los modelos climáticos en estas regiones socioeconómicamente relevantes de los océanos del mundo. Este grupo de trabajo también revisará y evaluará críticamente los diferentes enfoques de "ciencia dura" que se aplican con respecto a los beneficios socioeconómicos que podrían aportar.

Para lograr estos objetivos, el grupo científico está integrado por un equipo único de científicos que son expertos en las diferentes EBUS del mundo e involucrados en importantes programas nacionales e internacionales. Este grupo se ha compuesto para cubrir temas de observaciones y modelado, y, además, reunir a científicos de diferentes disciplinas provenientes de una variedad de países desarrollados y en vías de desarrollo. En ese sentido, el grupo SCOR es oportuno y está dirigido a facilitar las interacciones entre modeladores y expertos en observaciones. Esto asegurará 1) la comunicación de los resultados a la comunidad de investigación en general, y 2) la alineación con las plataformas de investigación tanto nacionales como mundiales. Para más detalles ir a: <http://intranet.igp.gob.pe/scor/preamble.php>

REFERENCIAS

- Bakun, A., et al. (2015). Anticipated Effects of Climate Change on Coastal Upwelling Ecosystems, *Curr. Clim. Change Rep.*, 1, 85–93.
- Bettencourt, J.H., et al. (2015). Boundaries of the Peruvian Oxygen Minimum Zone shaped by coherent mesoscale dynamics, *Nature Geosci.*, 8, 937–940.
- Breitburg, D., A. Levin, A. Oschlies, M. Grégoire, F.P. Chavez, D.J. Conley, V. Garçon, D. Gilbert, D. Gutiérrez, K. Isensee, G.S. Jacinto, K.E. Limburg, I. Montes, S.W.A. Naqvi, G.C. Pitcher, N.N. Rabalais, M.R. Roman, K.A. Rose, B.A. Seibel, M. Telszewski, M. Yasuhara, J. Zhang. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters, *Science*, 359, doi:10.1126/science.aam7240.
- Cabré, A., et al. (2015). OMZs in the tropical Pacific across CMIP5 models: mean state differences and climate change trends, *Biogeosciences*, 12, 6525–6587.
- Capet, A., et al. (2014). Implications of refined altimetry on estimates of meso-scale activity and eddy-driven offshore transport in the Eastern Boundary Upwelling Systems, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7602–7610.
- Capet, X., et al. (2008). Mesoscale to Submesoscale Transition in the California Current System. Part I: Flow Structure, Eddy Flux, and Observational Tests, *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 29–43.

- Capet, X.J., et al. (2004). Upwelling response to coastal wind profiles, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L13311.
- Carr, M.-E., and E. J. Kearns. (2003). Production regimes in four Eastern Boundary Current systems, *Deep Sea Res. Part II*, 50(22–26), 3199–3221.
- Chavez, F.P., and M. Messie. (2009). A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems, *Prog. Oceanogr.*, 83(1–4), 80–96.
- Chelton, D.B., et al. (2007). Summertime coupling between sea surface temperature and wind stress in the California Current System, *J. Phys. Oceanogr.*, 37, 495–517.
- Combes, V., et al. (2015). Interannual variability of the subsurface eddy field in the Southeast Pacific, *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 4907–4924, doi:10.1002/2014JC010265.
- Dewitte B., et al. (2012). Change in El Niño flavours over 1958–2008: Implications for the long-term trend of the upwelling off Peru, *Deep Sea Research II*, doi:10.1016/j.dsr2.2012.04.011.
- Franks, P.J.S., et al. (2013). Modeling Physical-Biological Responses to Climate Change in the California Current System, *Oceanography*, 26(3), 26–33.
- Gruber, N., et al. (2011). Eddy-induced reduction of biological production in eastern boundary upwelling systems, *Nature Geosci.*, 4, 787–792.
- Lachkar, Z., and N. Gruber. (2012). A comparative study of biological production in eastern boundary upwelling systems using an artificial neural network, *Biogeosciences*, 9, 293–308.
- Mackas, D.L., et al. (2006). Eastern ocean boundaries – pan regional overview. In: *The Global Coastal Ocean: Interdisciplinary Regional Studies and Syntheses – PanRegional Syntheses and the Coasts of North and South America and Asia*, The Sea, vol 14A. Robinson, A. R., and K. H. Brink (eds.), Harvard University Press., 2, 21–60.
- Neveu, E., et al. (2016). An historical analysis of the California Current circulation using ROMS 4D-Var: System configuration and diagnostics, *Ocean Modelling*, 99, 133–151.
- Pauly, D., and V. Christensen. (1995). Primary production required to sustain global fisheries, *Nature*, 374, 255–257.
- Pegliasco, C., et al. (2015). Main eddy vertical structures observed in the four major Eastern Boundary Upwelling Systems, *J. Geophys. Res.*, 120, 6008–6033.
- Renault, L., et al. (2016). Partial decoupling of primary productivity from upwelling in the California Current system, *Nature Geoscience*, 9, 505–508 doi:10.1038/ngeo2722
- Renault, L., et al. (2015). Orographic shaping of US West Coast wind profiles during the upwelling season, *Clim Dyn*, 46(1–2), pp.273–289.
- Richter, I. (2015). Climate model biases in the eastern tropical oceans: causes, impacts and ways forward, *WIREs Clim Change*, 6, 345–358.
- Rossi, V., et al. (2008). Comparative study of mixing and biological activity of the Benguela and Canary upwelling systems, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L11602.
- Saji, N.H., et al. (1999). A dipole mode in the tropical Indian Ocean, *Nature*, 401, 360–363
- Stramma, L., et al. (2010). Ocean oxygen minima expansions and their biological impacts, *Deep-Sea Res. Part I-Oceanographic Res. Papers*, 57, 587–595.
- Stramma, L., et al. (2012). Mismatch between observed and modeled trends in dissolved upper-ocean oxygen over the last 50 yr, *Biogeosciences*, 9(10), 4045–4057, doi:10.5194/bg-9-4045-2012.
- Takahashi K., et al. (2014). TPOS White Paper #8a – Regional applications of observations in the eastern Pacific: White Paper #8a- Report of the Tropical Pacific Observing System 2020 Workshop (TPOS 2020) GCOS-184, 2, 171–205, http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/Publications/gcos-184_II.pdf.
- Van der Lingen, C.D., et al. (2009). Chapter 8: Trophic dynamics of small pelagic fish. In: Checkley DM Jr, Roy C, Alheit J, Oozeki Y (Eds) *Climate Change and Small Pelagic Fish*. Cambridge University Press, 112–157.
- Van der Lingen, C.D., et al. (2006). Comparative trophodynamics of anchovy *Engraulis encrasicolus* and sardine *Sardinops sagax* in the southern Benguela: are species alternations between small pelagic fish trophodynamically mediated?, *African Journal of Marine Science*, 28 (3–4), 465–477, <http://dx.doi.org/10.2989/18142320609504199>.
- Wang, D., et al. (2015). Intensification and spatial homogenization of coastal upwelling under climate change, *Nature*, 518(7539), 390–394.
- Woodson, and Litvin, (2015). Ocean fronts drive marine fishery production and biogeochemical cycling, *PNAS*, 112 (6), 1710–1715, doi:10.1073/pnas.1417143112
- Zuidema et al. (2016). Challenges and Prospects for Reducing Coupled Climate Model SST Biases in the Eastern Tropical Atlantic and Pacific Oceans: The U.S. CLIVAR Eastern Tropical Oceans Synthesis Working Group. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 97, 2305–2328, doi:10.1175/BAMS-D-15-00274.1.