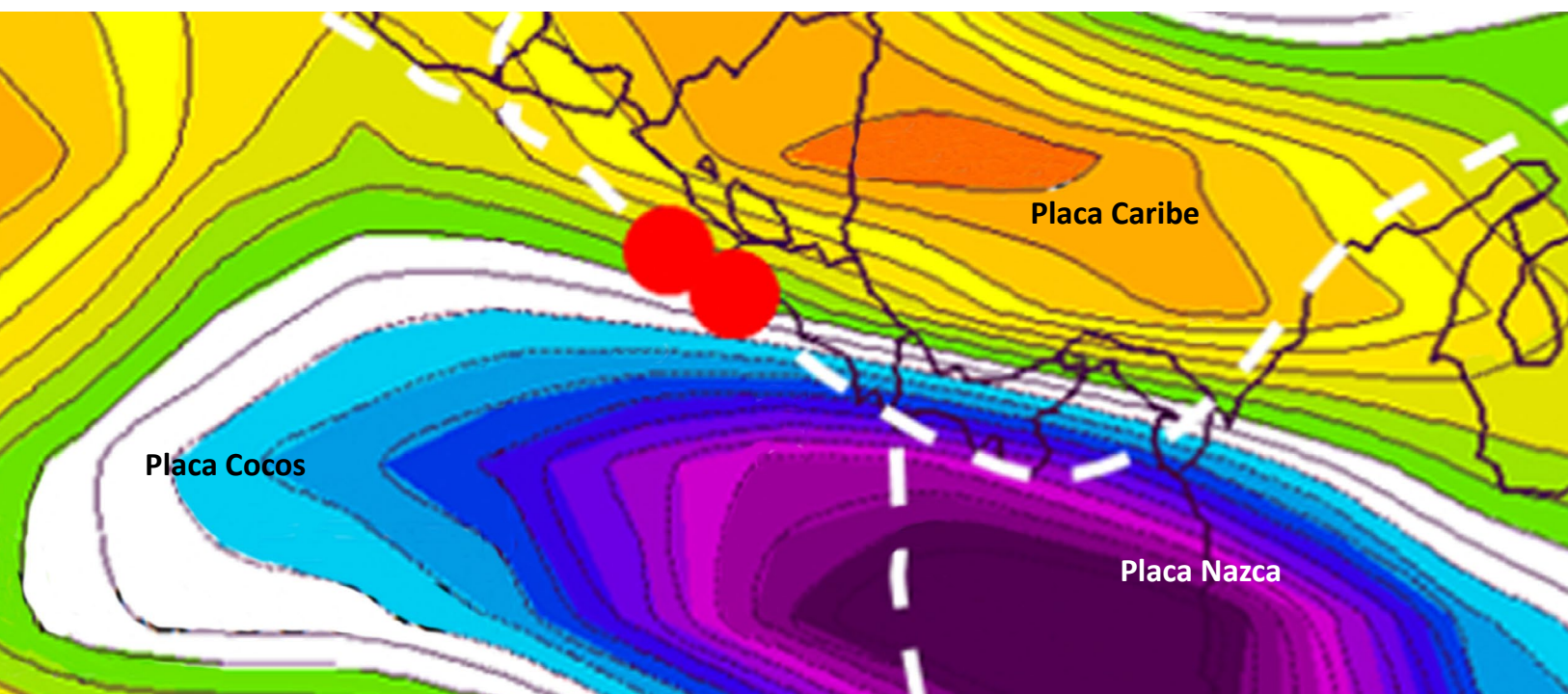


TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

ISSN 2953-738X

Volumen 17

Julio 2018



TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

ISSN 2953-738X

Volumen 17

Julio 2018

Editora:

Dra. Gladys Jiménez Valverde

Director de publicación:

MSc. Roberto Villalobos Flores

Comité editorial:

Lic. Werner Stolz España, MSc. María Esther Suárez Baltodano,
Ing. José Alberto Retana Barrantes, Lic. Luis Fernando Alvarado Gamboa

Diseño y diagramación:

Rodrigo Granados Jiménez

La revista "Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos" es publicada por el Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica. Tiene como finalidad dar a conocer los resultados de investigaciones y estudios en Ciencias de la Atmósfera y Oceanografía Física.

CONTENIDO

Pág. Artículo

- 5 La variabilidad climática y su influencia en la producción de café: Estudio de caso
JOHNNY MONTENEGRO
- 14 Acoples atmósfera – tierra sólida, observados en las zonas epicentrales de grandes y pequeños sismos
ELADIO ZÁRATE HERNÁNDEZ
- 41 Acoples a nivel mundial entre las placas tectónicas y la circulación general de la atmósfera antes y durante el disparo de erupciones volcánicas
ELADIO ZÁRATE HERNÁNDEZ

La variabilidad climática y su influencia en la producción de café: Estudio de caso

JOHNNY MONTENEGRO¹

RESUMEN

Para determinar la influencia del clima en la producción de café y estimar el efecto que el mismo podría tener en el futuro bajo un escenario de cambio climático, se analizó el registro productivo de 20 años de una plantación de café Caturra bajo sombra regulada. La información climática y productiva se agrupó en función de la cantidad de lluvia y se definieron cinco condiciones: seca, lluviosa, normal, ligeramente seca y ligeramente lluviosa. El análisis estadístico se realizó utilizando un diseño irrestricto al azar. Se valoró el potencial impacto económico que podría tener el clima en este cultivo y en mapas climáticos generados por el IMN se ubicó mediante coordenadas, la finca evaluada para conocer la tendencia climática en los próximos años. El análisis mostró una correlación negativa ($r=-0,53$, $P<0,0029$) entre la lluvia anual y la producción, la cual fue diferente ($P<0,0125$) entre condiciones climáticas, siendo superior bajo condición normal y seca comparada con las lluviosas. El análisis también mostró que más de 3.200 mm anuales reducen ($P<0,00135$) los rendimientos. No se determinó ningún efecto ($P>0,076$) de la radiación solar y la temperatura en la productividad. De acuerdo con la proyección climática, es probable que la lluvia aumente a un valor mayor que el óptimo para la producción de café en la región donde se ubica la finca. Esto tendría consecuencias negativas ya que los rendimientos productivos se reducirían significativamente. En el futuro cercano los rendimientos potencialmente se podrían reducir aproximadamente en un 31% por efecto de la lluvia.

PALABRAS CLAVE: CAFÉ, VULNERABILIDAD CLIMÁTICA, CAMBIO CLIMÁTICO, PRODUCTIVIDAD.

ABSTRACT

To determine the influence of climate on coffee production, and estimate the effect that it could have in the future under a climate change scenario, the productive record of 20 years of a Caturra coffee plantation under regulated shade was analyzed. The climatic and productive information was grouped according to the amount of rain, and five conditions were defined: dry, rainy, normal, slightly dry and slightly rainy. The statistical analysis was performed using an unrestricted random design. The potential economic impact that the climate could have on this crop was assessed, and climatic maps generated by the IMN were used to locate by coordinates, the climatic tendency for the next years in the evaluated farm. The analysis showed negative correlation ($r = -0.53$, $P<0.0029$) between rainfall and production, which was different ($P<0.0125$) between climatic conditions, being higher under normal and dry conditions compared to the rainy. The analysis also showed that more than 3,200 mm per year reduce ($P<0.00135$) yields. No effect ($P>0.076$) of solar radiation and temperature on productivity was determined. According to the climate projection, rain is likely to increase to a higher than optimal value for coffee production. This would have negative consequences since the productive yields are significantly reduced when the annual rainfall exceeds 3,200 mm. In the near future, yields could potentially be reduced by approximately 31% due to rain.

KEYWORDS: COFFEE PLANTATION, CLIMATIC VULNERABILITY, CLIMATE CHANGE, PRODUCTIVITY.

1 Investigador en Cambio Climático y Agricultura, Convenio Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA)–Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Costa Rica E-mail: jmontenegro@imn.ac.cr, jmontenegro@inta.go.cr

1. INTRODUCCIÓN

La producción agrícola está sujeta a la variabilidad del clima y aunque diferentes factores de producción tienen influencia directa en los rendimientos, al final es el clima que interactúa con ellos el que define o limita la producción. Es por ello que se debe determinar qué tan vulnerable es la productividad de cualquier actividad agropecuaria a los cambios que se suceden año con año en las condiciones del clima.

Actualmente debido a la influencia del calentamiento global, las condiciones típicas del clima han venido cambiando y se espera que cambien aún más, por lo que cada vez es más relevante disponer de este tipo de información técnica, que sirva de base para la toma de decisiones relacionadas con la continuidad de la actividad.

En este sentido, estudios de vulnerabilidad de las actividades agropecuarias relacionadas al factor climático representan una oportunidad para planificar acciones a desarrollar en el corto y mediano plazo, que permitan la adaptación de los sistemas productivos a las nuevas condiciones climáticas. Esto permitirá que los productores puedan continuar con sus actividades, de manera que se mantenga la estabilidad social y económica de un sector muy importante de la población costarricense, que contribuye con la economía y desarrollo del país.

Investigaciones previas han señalado diferentes niveles de reducción en los rendimientos del café como resultado del cambio de clima. Por ejemplo, Rivera (2013) señala en México disminuciones en el rango de 7 a 10%, Villalobos y Retana (1999) determinaron que los rendimientos productivos prácticamente no cambiarían si la temperatura se incrementaba un grado Celsius, mientras que la lluvia lo hacía entre 10% y 20%. Este último trabajo se realizó en el Valle Central de Costa Rica, con una precipitación promedio anual de 2.200 mm,

donde los años lluviosos recibieron más de 2.600 mm. De igual forma, CEPAL (2014) en un estudio de vulnerabilidad para este cultivo, menciona que en el caso de Costa Rica los rendimientos se estarían reduciendo alrededor de 10% como resultado del incremento en la temperatura y precipitación.

Similarmente en Tanzania, Craparo *et al.* (2015) determinaron que la producción de café en ese país se reduce $137 \pm 17 \text{ kg ha}^{-1}$ por cada 1°C de incremento en la temperatura mínima y la disminución de las lluvias, haciendo un llamado a países como Costa Rica que es productor de café y presenta similares condiciones climáticas como las analizadas en esa investigación.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se realizó la presente investigación con el propósito de determinar si existe influencia de algunas variables climáticas en la producción de café, en una finca ubicada en el cantón de Turrialba, Costa Rica, así como estimar el efecto que podría tener el clima futuro bajo un escenario de cambio climático en la productividad del café y ofrecer una visión que permita desarrollar estrategias para adaptar esta actividad a las nuevas condiciones climáticas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el propósito de comprobar o refutar si existe efecto de algunas variables climáticas en la producción de café, se seleccionó una finca comercial de 674 ha, ubicada en Santa Rosa, Turrialba, Costa Rica, de la cual se obtuvo información de producción anual. El registro productivo disponible en esta finca inicia con la cosecha 1980/1981 y se extiende ininterrumpidamente hasta el 2010/2011, período del cual también se dispone de información del área sembrada, así como del cambio de la misma en el tiempo. Con estos datos se calculó la productividad anual de la finca.

2.1. Descripción del sistema productivo evaluado

De acuerdo con Holdridge (2005), esta finca se ubica en la zona de vida bosque muy húmedo tropical (bmh-T), donde la mayor parte del área sembrada de café se encuentra en un rango entre 1.000 y 1.200 msnm. Los suelos son predominantemente Andisoles e Inseptisoles, sobre los cuales se estableció la plantación de café hace más de 30 años.

La variedad sembrada es Caturra, a una densidad de 5.000 plantas ha⁻¹ (2,0 x 1,0 m) y es manejada con un sistema de poda por planta; crece bajo sombra regulada de Poró (*Erithryna* spp) a la cual se le practica una poda anual, también parte de la plantación se encuentra bajo sombra de maderables autóctonos. La plantación recibe fertilización consistente en 240 kg de nitrógeno y 115 kg de potasio año⁻¹. Adicionalmente se aplica 1 t de carbonato de calcio ha⁻¹ cada año.

2.2. Información meteorológica

Esta finca posee su propio pluviógrafo, el cual registra la lluvia diaria desde 1978, siendo la precipitación promedio anual del período analizado de 3.062±517 mm.

Para obtener información de otras variables climáticas (temperatura del aire y radiación solar), se accedió la estación meteorológica más cercana, la cual se ubica a una altitud inferior (600 msnm y aproximadamente 9 km al sur) de donde se localiza la finca de café objeto de este estudio. La temperatura se ajustó en función del cambio en la altura (-0,6°C por cada 100 m de incremento en la altura) y en el caso de la radiación se asumió que fue similar a la que se determinó en la estación meteorológica.

2.3. Análisis de clima vs productividad

Los datos de rendimiento y la información climática fueron ordenados de manera conjunta y en orden ascendente según la variable lluvia en percentiles, para posteriormente agruparla en cinco conglomerados los cuales se denominaron condición climática. De esta manera se obtuvieron dos grupos extremos (uno seco y otro lluvioso), así como un grupo central o normal con dos rangos de variación (las condiciones climáticas inmediatamente inferior y superior denominadas ligeramente seca y ligeramente lluviosa).

El análisis estadístico de la productividad se realizó mediante un ANDEVA, utilizando un diseño irrestricto al azar, y se determinaron las diferencias entre condición climática de acuerdo con Tukey (P<0,05) utilizando para ello Infostat (DiRienzo *et al.*, 2015).

Este análisis no hace relación alguna de la producción con problemas fitosanitarios, aunque se reconoce que los mismos podrían agravarse o bien, aparecer nuevos problemas dependiendo de condiciones climáticas específicas.

2.3.1 Valoración económica

Para valorar el potencial impacto económico que puede tener el clima en el rendimiento productivo del cultivo, se comparó el ingreso por unidad de área cuando la cosecha de café ocurre bajo la condición climática lluviosa con la condición climática seca. Para la cuantificación económica se utilizó el precio que el productor recibió por fanega en la última cosecha analizada y que corresponde a la del 2010/2011.

2.4. Productividad y condiciones climáticas futuras

Para determinar el efecto potencial que puede tener el clima futuro bajo un escenario de

cambio climático en la producción de este grano, se utilizaron los mapas generados por el Instituto Meteorológico Nacional (Alvarado *et al.*, 2012) en los que se detalla la proyección climática para Costa Rica, específicamente relacionada con lluvia y temperatura de acuerdo con el escenario SRES 2 (A2) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) (IPCC, 2000).

Se ubicó la finca evaluada en los mapas de clima futuro, para conocer la tendencia climática que se estaría presentado en los próximos años. Con base en ello y los resultados de los análisis realizados, se infirió el posible efecto que el clima futuro podría tener en el rendimiento de este cultivo.

3. RESULTADOS

3.1. Productividad histórica

La productividad histórica de café mostró variaciones importantes a través del tiempo y presentó un rango de entre 17 y 53 fanegas ha^{-1} año $^{-1}$ (figura 1). Este rango tendió a disminuir

visiblemente a partir de la cosecha 2006/2007, cuando la producción parece volverse más estable (promedio de $33,3 \pm 2,4$ fanegas ha^{-1}) mostrando una menor variación a la observada previamente. Probablemente la continuidad y estabilidad del manejo agronómico aplicado a la plantación, se refleja en esta menor variabilidad anual de la productividad.

Durante el periodo analizado, el promedio productivo fue $34,8 \pm 9,2$ fanegas ha^{-1} año $^{-1}$ y para la cosecha 2010/2011 el rendimiento fue 37,1 fanegas ha^{-1} , ambos valores son superiores al promedio nacional, ya que la cosecha en mención fue de 24,9 fanegas ha^{-1} de acuerdo con SEPSA (2012).

3.2. Análisis de clima vs productividad

3.2.1 Efecto de la lluvia

Al analizar la totalidad de la información y sin realizar agrupamiento alguno por condición climática, se determinó una correlación negativa ($r = -0,53$, $P < 0,0029$) entre la cantidad de lluvia anual y la productividad del café (figura 2).

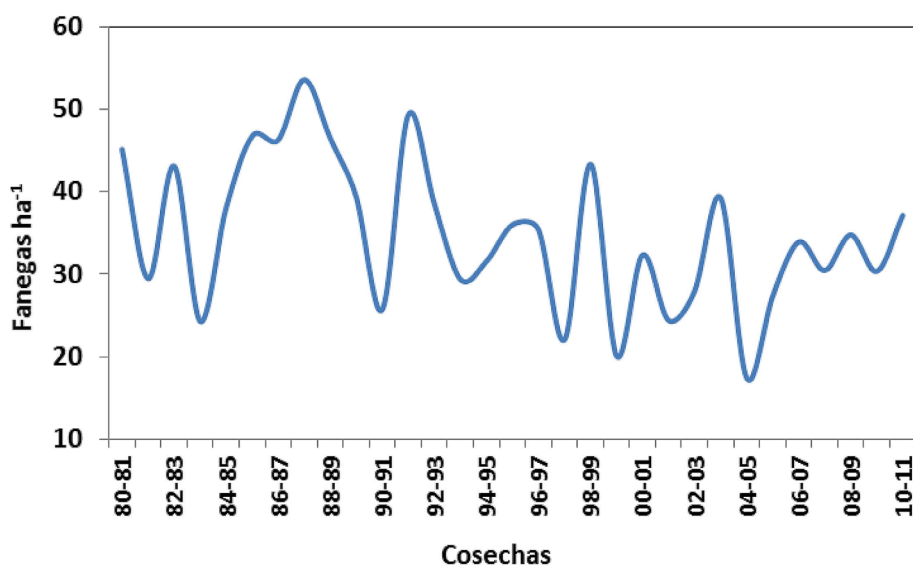


Figura 1. Productividad anual (fanegas ha^{-1}) de una plantación de café bajo sombra regulada en Turrialba. 2014.

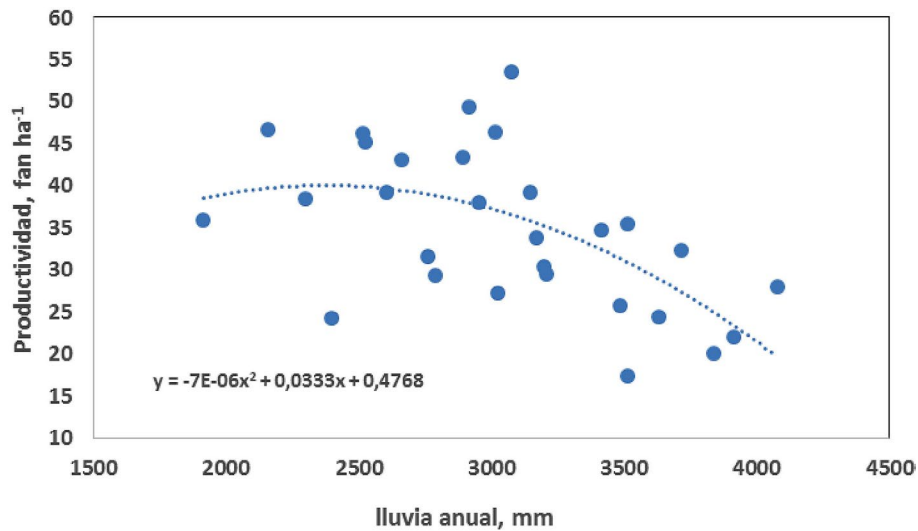


Figura 2. Relación entre productividad (fanegas ha⁻¹ año⁻¹) y lluvia anual (mm), en una plantación de café bajo sombra regulada en Turrialba.

Los mejores rendimientos se logran cuando las lluvias son inferiores a los 3.000 mm anuales y conforme estas se incrementan, la productividad disminuye drásticamente (figura 2).

3.2.2 Efecto de la radiación y la temperatura

La radiación solar y temperatura mostraron variaciones en el tiempo (figura 3), sin embargo,

no presentaron correlación estadística significativa con la productividad. Posiblemente esto se explica porque la radiación presentó valores superiores al mínimo requerido para el buen desenvolvimiento fotosintético de las plantas de café (DaMatta *et al.* 2007).

De igual forma, la temperatura presentó un rango entre 19 y 21°C (figura 3) y aunque mostró variaciones interanuales, estuvo en el

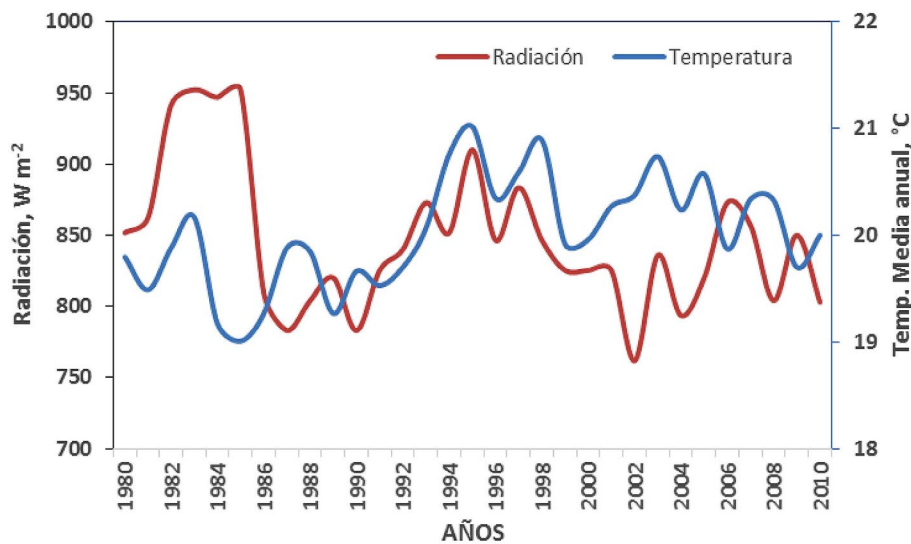


Figura 3. Radiación solar (W m⁻²) y temperatura promedio anual (°C), determinada en una plantación de café bajo sombra regulada, ubicada en la región de Turrialba.

rango óptimo para el crecimiento y desarrollo de la planta de café (DaMatta *et al.* 2007). Esto probablemente hizo que no se mostrara relación alguna o tendencia claramente definida entre esta variable y la productividad.

3.3. Relación entre productividad y condición climática

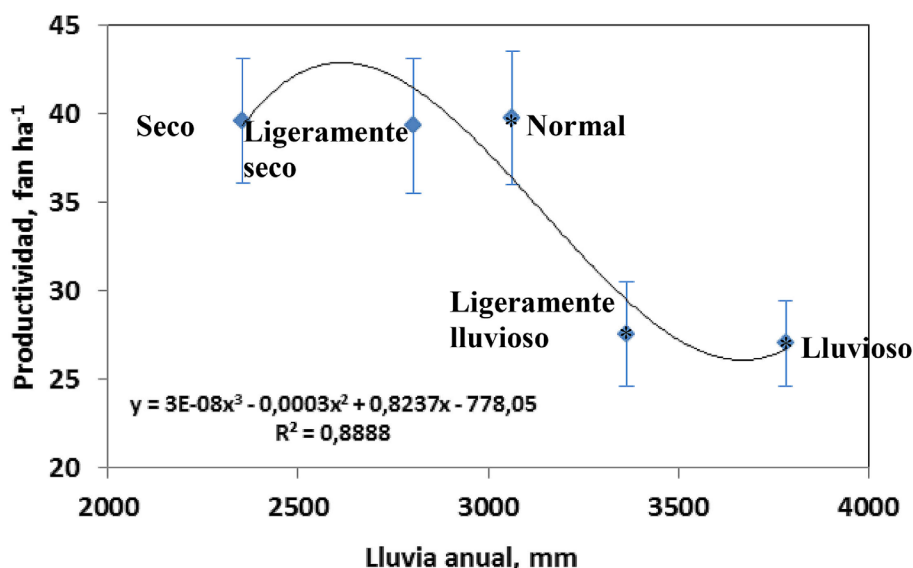
3.3.1 Lluvia anual

La productividad agrupada de acuerdo con la metodología utilizada para clasificar la lluvia en cluster, muestra que los rendimientos productivos son diferentes ($P<0,0125$) entre condiciones

climáticas, siendo superior la productividad cuando la condición climática se encuentra entre normal y seca, comparada con aquellas condiciones más lluviosas (figura 4 y cuadro 1).

El análisis también mostró, que existe una tendencia negativa entre la cantidad de lluvia anual y la productividad, ya que cuando la lluvia es superior a 3.200 mm anuales se reducen ($P<0,00135$) los rendimientos por unidad de área (figura 4).

De acuerdo con lo anterior, la producción de café en la finca donde se realizó este análisis, muestra que los rendimientos son relativamente estables cuando la lluvia anual se mantiene en un rango entre 1.915 y 3.172 mm (cuadro 1).



*Condición climática, valores promedio $\pm$ 1 error estándar (EE).

Figura 4. Precipitación anual (mm) y productividad (fanega ha⁻¹ año⁻¹), según condición climática, en una plantación de café bajo sombra regulada en Turrialba

Cuadro 1. Productividad (fanegas ha⁻¹ año⁻¹), y lluvia anual (mm), según condición climática, en una plantación de café bajo sombra regulada en Turrialba

Condición climática	Productividad*, fan ha ⁻¹ año ⁻¹	Rango lluvia anual, mm	Lluvia anual*, mm
Seca	39,6 $\pm$ 3,5 ^a	1.915 – 2.607	2.354 $\pm$ 108
Ligeramente seca	39,3 $\pm$ 3,8 ^a	2.663 – 2.917	2.804 $\pm$ 46
Normal	39,8 $\pm$ 3,8 ^a	2.956 – 3.172	3.064 $\pm$ 34
Ligeramente lluviosa	27,6 $\pm$ 2,9 ^b	3.200 – 3.512	3.365 $\pm$ 67
Lluviosa	27,0 $\pm$ 2,4 ^b	3.514 – 4.078	3.782 $\pm$ 83

* Valores promedio $\pm$ 1 EE con diferente letra difieren al nivel $P<0,0351$.

3.3.2 Radiación solar y temperatura

No se determinó efecto alguno ($P>0,076$) de la radiación solar y la temperatura en la productividad de este cultivo, bajo las condiciones en que se desarrolla en la finca evaluada. Valores superiores a los mínimos requeridos pueden explicar la falta de correlación entre estas variables.

Se demuestra que de las variables climáticas evaluadas, la lluvia es el factor que se asocia directa y negativamente con los rendimientos productivos del café, lo cual podría explicarse por varias razones:

- La lluvia tiene efecto importante en la caída de granos, especialmente cuando están maduros y próximos a ser recolectados, de manera que si no se dispone de la mano de obra necesaria para realizar la recolección a tiempo, una parte significativa de la misma se caerá y ello se refleja en menores rendimientos, lo cual significa menores ingresos para el productor.
- El cultivo de café presenta un rango óptimo de lluvia en el cual se llenan los requisitos hídricos necesarios para la planta, este rango está entre 1.200 y 3.100 mm anuales (DaMatta *et al.* 2007). Tal y como se deduce de los registros de la lluvia observada en la finca evaluada (cuadro 1), por las condiciones climáticas imperantes en esa región se presentan precipitaciones anuales que son superiores al límite superior del rango recomendado para este cultivo, lo que tiene efectos negativos significativos en los rendimientos productivos.
- El exceso de humedad provocado por las lluvias estaría posiblemente, causando el lavado de diferentes nutrientes como el nitrógeno del suelo, el cual se relaciona directamente con los rendimientos productivos del cultivo. Esta pérdida de nutrientes se traduciría en plantas menos vigorosas y de menor productividad.
- El incremento de las lluvias probablemente lleve consigo mayor nubosidad, lo cual implica que

conforme la precipitación anual se incrementa se reduce la radiación. Esto significa que también disminuye la capacidad de fotosíntesis de la planta, lo cual se traduciría en menos fotosintatos y en menor capacidad productiva de la planta. Si bien la radiación promedio anual recibida fue superior a la requerida por el cultivo de café, es probable que en algunos momentos durante la época lluviosa esta sea menor al mínimo necesario, lo que tendría un efecto negativo en los rendimientos.

3.4. Productividad y condiciones climáticas futuras: Vulnerabilidad

La proyección climática realizada por el Instituto Meteorológico Nacional (Alvarado *et al.* 2012), muestra que lo más probable que ocurra en los próximos 25 años en la región donde se ubica la finca evaluada, es el incremento tanto de la precipitación pluvial (al menos 10%), como de la temperatura (aproximadamente $1,0^{\circ}\text{C}$).

La información analizada mostró, que la producción de café en esta finca es inversa a la cantidad de lluvia. En consecuencia, considerando la condición climática denominada normal y la proyección efectuada por el IMN, es muy probable que la lluvia promedio anual aumente a un valor mayor que el identificado como óptimo para la producción de café (DaMatta *et al.*, 2007). Esto tendría consecuencias negativas en términos de productividad, ya que de acuerdo con la información histórica, los rendimientos productivos disminuyen significativamente cuando la lluvia promedio anual supera los 3.200 mm (cuadro 1).

En cuanto a la temperatura, la proyección climática muestra que esta se estaría incrementando en el futuro cercano. El análisis realizado mostró una leve tendencia de disminución en los rendimientos con el incremento en la temperatura, quizás el aumento de la temperatura podría definir más claramente dicha tendencia a la disminución de los rendimientos del café por unidad de área.

Por otra parte, hay que considerar potenciales cambios en la calidad del café como resultado de este incremento de la temperatura. En este sentido, está bien establecido que la mejor calidad de café se produce a alturas superiores a 1.000 metros sobre el nivel del mar, lo cual es un efecto de la temperatura moderada en la fisiología de la planta. Temperaturas moderadas tienden a producir café de mejor calidad al reducirse la tasa de crecimiento del grano durante su desarrollo, lo cual influye directamente en el grado de dureza del mismo y en la calidad de tasa.

En consecuencia, el incremento en la temperatura conllevaría la reducción de la calidad del café producido bajo esas nuevas condiciones climáticas, lo cual se transformaría en menores ingresos por unidad de producto vendido por el agricultor.

Según lo muestra la predicción de Alvarado *et al.* (2012) y la información desarrollada por Cleves citado por Rojas (1987), si se da el aumento de temperatura de 1,0°C, esto haría que la calidad del café producido se reduzca de **HARD BEAN** a **GOOD HARD BEAN** o **MEDIUM HARD BEAN**. Además la calidad del café pasaría de la categoría **STRICTLY HARD-BEAN** a **HARD-BEAN**, lo que significaría una reducción en los ingresos de los productores al ser el café un cultivo donde el precio final de venta depende de la calidad.

3.5. Valoración económica

En términos productivos, los rendimientos se reducirían aproximadamente en 31% por unidad de área, lo cual y de acuerdo con el precio de liquidación pagado al productor en el 2014 (\$150 fan⁻¹) y la productividad de la finca analizada (39,5 fan ha⁻¹), el efecto del incremento de la lluvia podría significar la pérdida de \$1.830 por cada hectárea de café en producción.

Ante este panorama ¿Qué podría hacer el productor para adaptarse a estas nuevas

condiciones ambientales y continuar en la actividad? Algunas modificaciones técnicas que podrían ser implementadas en la finca serían:

- Incrementar la distancia de siembra entre plantas (bajar la densidad de plantación) para favorecer la circulación del viento y con ello facilitar la evaporación.
- Modificar el manejo de la sombra, con lo cual probablemente haya que podar con mayor frecuencia y/o utilizar especies de mayor altura y de hoja más fina, de manera que reduzcan la temperatura en el cultivo pero que a la vez permitan buena circulación del aire para favorecer el secado más rápido del suelo y las plantas.
- Uso de fertilizantes de lenta liberación para reducir las pérdidas del lavado de nutrientes.
- Construcción de drenajes o utilizar un sistema de siembra que favorezca la eliminación de los excesos de agua del suelo.
- Identificar materiales genéticos que sean menos susceptibles a la caída del grano bajo condiciones lluviosas y a problemas fitopatológicos.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en el análisis realizado, se puede concluir:

- a) Los niveles de lluvia anual superiores a 3.200 mm reducen la productividad del cultivo del café.
- b) La temperatura observada no mostró claro efecto en los rendimientos productivos, sin embargo, la proyección de esta variable muestra que tiene gran potencial para reducir la calidad del café.

- c) Los escenarios de cambio climático futuros no son promisorios para la actividad del café en la finca analizada, por lo que se necesitaría implementar otras estrategias de adaptación para buscar la continuidad y sustentabilidad de dicho cultivo.

Por lo anterior se recomienda:

- a) Realizar estudios similares en otros sitios del país con diferentes condiciones climáticas, donde se produzca café con y sin sombra, para determinar el efecto del clima en los rendimientos productivos de este cultivo en diferentes regiones cafetaleras y distinto manejo técnico.
- b) Identificar nuevos materiales genéticos, con calidad de tasa similar o mejor que las utilizadas actualmente, para que puedan ser empleadas en las condiciones climáticas proyectadas bajo el escenario de cambio climático.
- c) Que el Ministerio de Agricultura y Ganadería continúe apoyando decididamente los proyectos y programas, tendientes a implementar las anteriores recomendaciones para beneficio de los productores nacionales, de manera que contribuya con la adaptación de este cultivo al cambio climático y con ello mantener la seguridad social y económica de un sector muy importante de la población nacional.

5. LITERATURA CITADA

- Alvarado, L.; Contreras, W.; Alfaro, M. y Jiménez, E. (2012). *Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica*. IMN-MINAET-PNUD. 1060 p.
- CEPAL. (2014). *Impactos potenciales del cambio climático sobre el café en Centroamérica*. LC/MEX/L.1169, México, D.F. 129 p.
- Craparo, A.; Van Asten, P.; Laderach, P.; Jassogne, L. & Grab, S. (2015). Coffee arabica yields decline in Tanzania due to climate change: Global implications. *Agricultural and Forest Meteorology* 207:1–10.
- DaMatta, F.; Ronchi, C.; Maestri, M. & Barros, R. (2007). Ecophysiology of coffee growth and production. *Braz. J. Plant Physiol.* Vol.19 no.4. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014>.
- Di Rienzo, J.; Casanoves, F.; Balzarini, M.; González, L.; Tablada, M. y Robledo, C. (2015). *InfoStat*. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Recuperado de URL <http://www.infostat.com.ar>
- Fournier, L. y Di Stefano, J. (2004). Variaciones climáticas entre 1988 y 2001, y sus posibles efectos sobre la fenología de varias especies leñosas u el manejo de un cafetal con sombra en ciudad Colón de Mora, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 28(1): 101-120.
- Holdridge, L. (2005). *Mapa de zonas de vida*. Recuperado de: <http://www.cct.or.cr/mapas/zonas-de-vida-costa-rica.pdf>
- IPCC SRES. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios. A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Rivera, M. (2013). *Vulnerabilidad del cultivo del café al cambio climático global en el estado de Veracruz, México*. Tesis maestría, Colegio de Postgraduados. 72 p.
- Rojas, O. (1987). *Zonificación agroecológica para el cultivo del café (Coffea Arabica) en Costa Rica*. IICA. SERIE Publicaciones Misceláneas. No A1/OCR-87007-ISSN-0534-5391. 83 P
- SEPSA. (2012). *Boletín estadístico agropecuario No. 22*. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Secretaría de Planificación Sectorial Agropecuaria, Estudios Económicos e Información. 186 p.
- Villallobos, R. y Retana, J. (1999). *Evaluación del impacto del cambio climático sobre la producción agrícola de Costa Rica. Caso de estudio: Café*. MINAE/IMN, San José, Costa Rica. 13 p.

Acoples atmósfera – tierra sólida, observados en las zonas epicentrales de grandes y pequeños sismos

ELADIO ZÁRATE HERNÁNDEZ¹

Resumen

Este trabajo identifica anomalías troposféricas que presentan grandes espesores verticales, enormes extensiones geográficas e importantes duraciones temporales, en el período 1948-2015, las cuales parecen acoplarse bastante bien con las placas tectónicas y epicentros sísmicos para el disparo de eventos telúricos. La gran mayoría de los científicos que trabajan en los campos de la sismicidad y la meteorología, consideran que no existe relación alguna entre los sismos y los procesos atmosféricos. Dado que otros estudios mencionados aquí han identificado cambios en el comportamiento del momento angular de la atmósfera y en la Longitud del Día al instante en que ocurren terremotos de magnitudes importantes, parece que la sismicidad estaría estrechamente vinculada con la atmósfera a través de la circulación general de la misma.

El objetivo de esta investigación, es mostrar que los acoples atmósfera-tierra sólida aquí identificados, dejan poco margen para pensar que se trata de meras casualidades. Se incluyen 25 eventos sísmicos con magnitudes que varían desde el nivel de megaterremotos hasta sismicidad medida pero no sentida, y se muestra que los acoples entre los eventos sísmicos y las anomalías troposféricas guardan estrecha similitud independientemente de sus magnitudes.

PALABRAS CLAVE: ACOPLA, TERREMOTO, PLACA TECTÓNICA, CIRCULACIONES HORARIAS Y ANTIHORARIAS.

Abstract

This work identifies tropospheric anomalies of great vertical depth, enormous geographic size and important time-duration in the period 1948-2015, which seem to be coupled with the tectonic plates and seismic epicenters to trigger earthquakes. The great majority of the scientists that work in the fields of seismicity and meteorology consider that there is no any relationship among earthquakes and the atmospheric processes. Given that other studies mentioned here have identified changes in the atmospheric angular momentum and the Length of Day (LOD) at the moment when intense earthquakes occur, it seems then that the seismicity is strongly tied to the atmosphere through its general circulation.

The objective of this work is to show that the atmosphere-solid earth couplings identified here leave little margin to think that they occur by mere coincidence. 25 seismic events with magnitudes that vary from megathrust earthquakes to seismicity recorded but not felt are included, showing that the couplings among the seismic events with the tropospheric anomalies have close similarities regardless of their magnitudes.

KEYWORDS: COUPLING, EARTHQUAKE, TECTONIC PLATE, CLOCKWISE AND COUNTERCLOCKWISE CIRCULATIONS.

1 Investigador *ad-honorem*, Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. Correo electrónico: eladio.zarate@ucr.ac.cr

1. INTRODUCCIÓN

Las posibles interacciones entre los procesos atmosféricos y los de tierra sólida han venido siendo señalados y documentados desde hace varias décadas. En lo relativo a los acoples sismo-ionosféricos, Leonard y Barnes (1965) señalaron por primera vez disturbios ionosféricos previos al gran terremoto de Alaska, en marzo de 1964. Posterior a ello se han seguido encontrando anomalías ionosféricas identificadas con diferentes metodologías, técnicas y modelajes, previas al acontecimiento de terremotos en todas partes del mundo. Ding et al. (2005) analizaron datos ionosféricos y geomagnéticos en China antes de dos terremotos: el de Mani (7.5 Mw, el 8 de noviembre de 1987) y el de Kunlunshan (8.1 Mw, el 14 de noviembre de 2001). Encontraron que las características de las anomalías espaciales y temporales de corto plazo de los campos ionosféricos y geomagnéticos inmediatas a los terremotos, eran consistentes.

Omori et al. (2007), estudiaron la concentración de gas radón en la atmósfera en el área del terremoto de Kobe, en enero de 1995, con una serie de datos que se extendían desde el año 1984 hasta 11 días después de dicho terremoto. La concentración de radón se comenzó a elevar sensiblemente desde dos meses antes del terremoto, hasta sobrepasar el nivel de tres desviaciones estándar para la fecha del terremoto.

Yao et al. (2011), estudiaron las anomalías ionosféricas que precedieron al terremoto del 11 de marzo de 2011 en Japón. Encontraron una anomalía muy clara el día 8 de marzo, que duró seis horas en el mapa de distribución del contenido total vertical de electrones, lo cual se considera un precursor muy posible del terremoto, dado que no se identificaron otras anomalías similares en otras partes del mundo en la misma fecha. Datos de un software desarrollado por el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA (RT, 6 de mayo, 2006) revelaron que el terremoto

que sacudió a Nepal el 25 de abril de 2015, creó ondas de energía que penetraron en la atmósfera superior, perturbando la distribución de los electrones en la ionósfera situada entre 60 y 1.000 kilómetros sobre la superficie de la tierra. Dichas perturbaciones fueron detectadas gracias a las señales transmitidas por un sistema GPS y fueron recibidas por un receptor situado cerca de Nepal. Otras anomalías ionosféricas estudiadas por Ouzounov et al. (2011) con relación al terremoto de Japón del 11 de marzo de 2011, se presentan más adelante al analizar dicho evento sísmico.

Algunos científicos han ligado la sismicidad con diversas variables atmosféricas diferentes a las ionosféricas. Namias (1989), confirmó una hipótesis que había planteado previamente, en el sentido de que las configuraciones de la presión y el viento sobre una amplia porción del hemisferio norte disparaban (o disminuían) la sismicidad de moderada magnitud en el sur de California. Sasorova et al. (2013) estudiaron 250.000 sismos ≥ 4 Mw distribuidos en todo el planeta, tomados del Catálogo del Centro Sismológico Internacional a partir de 1964. Encontraron que la actividad sísmica y la liberación de la energía sísmica están casi ausentes en los polos, mientras que existen picos máximos de ambos en las latitudes medias de los hemisferios norte y sur (40-50N y 20-35S), y un mínimo en las latitudes ecuatoriales, con lo cual la distribución de densidad de la sismicidad y la energía sísmica en el planeta exhibe estructuras bimodales bien distintivas. Resulta interesante que estos dos cinturones latitudinales coinciden bastante bien con la posición de las corrientes en chorro de la troposfera alta, aspecto que cobra gran relevancia en el desarrollo de esta investigación.

Watada et al. (2006) encontraron cambios bien distintivos en la presión atmosférica, asociados al terremoto de 8.3 Mw en Tokachi-Oki, Japón, en el 2003. Los cambios fueron registrados con microbarógrafos distribuidos en el territorio de Japón, los cuales iniciaron con la llegada de las ondas sísmicas y alcanzaron su máxima amplitud

con la llegada de las ondas Rayleigh, lo que sugiere que los cambios observados en la presión son causados por el movimiento del terreno al paso de las ondas sísmicas. Nishida y Takagi (2016) utilizando más de 200 estaciones operadas por el Instituto Nacional para la Investigación de la Ciencia de la Tierra y Prevención de Desastres, en el distrito japonés de Chugoku, detectaron microsismos de onda P y S desencadenados por una intensa y distante tormenta en el Atlántico Norte sobre Groenlandia e Islandia, conocida como bomba de tiempo. A medida que la tormenta se desarrolló, ondas resultantes golpearon el suelo marino entre Groenlandia e Islandia y se propagaron a través de la tierra para ser detectados en lugares remotos.

En otros tipos de relaciones atmósfera-litosfera, Richard Gross del Laboratorio de Propulsión de la NASA, entrevistado por Deborah Byrd (Byrd, D.11 March, 2012), indicó que utilizando un modelo más reciente y actualizado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), determinó que con el terremoto de Japón del 11 de marzo de 2011, la Longitud del Día se habría acortado en 1.4 microsegundos. Haciendo los mismos cálculos para el terremoto de Chile en mayo de 1960 (9.5 Mw), el resultado fue que la Longitud del Día se acortó en 8 microsegundos. En ambos casos el planeta ganó velocidad angular, de ahí que se acortó la Longitud del Día.

Zharov (1996) encontró, que los cambios rápidos en las funciones del momento angular atmosférico efectivo (AAM) eran comparables con la ocurrencia de los terremotos fuertes (magnitud de onda de cuerpo $m_b \geq 6.0$) y con cambios rápidos en los parámetros de rotación de la tierra, lo cual lleva a una fuerte correlación entre los cambios de las funciones del momento angular atmosférico y los instantes en que suceden los terremotos. Se puede decir entonces con razonable confianza, que los cambios tipo delta en el momento angular atmosférico axial, pueden actuar en el disparo de terremotos. Esta aseveración se hace con

base en consideraciones de energía entre los disturbios atmosféricos de alta frecuencia, y la energía liberada en los terremotos más fuertes en el periodo estudiado (del 5 de enero de 1984 hasta 21 de febrero de 1991). La conclusión es que la atmósfera actúa tanto sobre la rotación de la tierra, como al momento en que acontecen los terremotos.

Estos hallazgos de Zharov resultan de mayor importancia para este estudio, dado que los acoples troposfera-sismicidad parecen llevarse a cabo con la participación de la circulación general de la atmósfera, tal como se analiza más adelante, principal factor entre los varios que intervienen en el balance del momento angular tierra sólida-atmósfera.

Driscoll (2010) indica que el momento angular total de la atmósfera, océanos y tierra sólida se mantiene constante en el largo plazo, excepto por un lento decrecimiento secular debido a la fuerza gravitacional ejercida por los planetas. Sin embargo, para plazos cortos existe transferencia entre los tres componentes mencionados, de tal forma que si el momento angular de la atmósfera se incrementa, tiene que haber sido transferido de uno de los otros elementos hacia la atmósfera. Análogamente si la atmósfera pierde momento angular, este tiene que haber sido transferido hacia uno de los otros elementos. Por ejemplo, cuando las corrientes en chorro del hemisferio norte alcanzan su máxima velocidad en el invierno boreal, el momento angular de la tierra sólida pasa por un mínimo y cuando en el verano boreal las corrientes en chorro muestran su mínima velocidad, el momento angular de la tierra sólida es máximo. Como se verá a lo largo del trabajo, todos estos conceptos resultan de interés al ligar la sismicidad con la atmósfera.

Al analizar las interacciones entre la tierra sólida y la atmósfera en las referencias hasta aquí revisadas, queda la impresión de que existe un vacío entre los mecanismos conectores, entre la sismicidad

(litosfera) con la ionosfera, el momento angular y las variaciones en la Longitud del Día. Ese vacío parece surgir de la no inclusión, o inclusión parcial de la troposfera como mecanismo de conexión e interacción en dichos procesos. La troposfera es la región inferior de la atmósfera cuyo espesor varía en función de la latitud geográfica; siendo de 9 km en los polos, 11 km en latitudes medias y 16 km en los trópicos. Su característica principal es que en ella se presentan casi la totalidad de los fenómenos meteorológicos que afectan la vida en la tierra y contiene cerca del 85% de la masa atmosférica. Este trabajo pretende llenar ese vacío, conectando la litosfera con la troposfera a través de la circulación general de la atmósfera. Esto se lleva a cabo relacionando las zonas epicentrales de los eventos sísmicos, con las anomalías del campo del potencial de la velocidad a escala planetaria y con los campos de la presión y el viento en la escala sinóptica.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo se basa en una metodología observacional de acoples, entre anomalías en la troposfera con eventos sísmicos profundos, intermedios y superficiales, interplaca e intraplaca, encontrados en todas partes del mundo y en todas las épocas del año.

En el periodo 1948-2015 se incluyeron 25 eventos sísmicos, con magnitudes que varían desde el nivel de megaterremotos hasta sismicidad medida pero no sentida. Las características de los acoples entre los eventos sísmicos con las anomalías troposféricas, son altamente similares. Por esta razón, se realizó un análisis bastante detallado para el primer terremoto, ocurrido en Japón el 11 de marzo de 2011, y luego se procede a analizar los restantes con menor detalle.

Para visualizar al máximo los tipos de las anomalías atmosféricas encontradas, con relación a los diferentes sismos analizados, se utilizaron mapas

meteorológicos diferentes tales como: un solo nivel isobárico, por ejemplo 500 hPa; dos o más niveles isobáricos; una capa atmosférica entera, por ejemplo la capa 850-200 hPa; o una mezcla de este tipo de mapas. Se consideró que mostrar un único tipo de mapas a lo largo de todo el artículo, impedía en alguna medida mostrar la riqueza de un análisis que se podía lograr con un método más flexible.

Todos los mapas meteorológicos se confeccionaron utilizando la siguiente fuente: "Image provided by the NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>" (ESRL s.f). Las anomalías utilizadas en los mapas meteorológicos se calculan con respecto al periodo climático 1981-2010.

Se aplicó una metodología observacional compilada como casos de estudio, comparando las anomalías troposféricas con la posición geográfica de los epicentros sísmicos. Se esbozan hipótesis dirigidas a entender los aparentes acoples entre la troposfera y la litosfera, y se propone un mecanismo de acople Troposfera-Litosfera (TL).

En las figuras se utilizan las siguientes simbologías: un punto rojo para indicar epicentros sísmicos; flechas para indicar las direcciones del vector viento o sus componentes zonal y meridional; al pie de las figuras se utilizan las siguientes abreviaturas: izq: izquierda, der: derecha, arr: arriba, ab: abajo.

Los aspectos de la tierra sólida utilizados en el estudio, se circunscriben a la ubicación de los epicentros sísmicos y otros datos. Por su parte, la terminología atmosférica utilizada requiere de algunas definiciones que se ofrecen a continuación:

- **Potencial de la velocidad:** es un campo escalar que describe la parte divergente irrotacional del viento en un flujo horizontal. El gradiente del potencial de la velocidad describe la

componente divergente del viento, mientras que la divergencia del viento está dada por el Laplaciano (curvatura) del potencial de la velocidad. Por lo general, centros de regiones con potencial positivo muestran vientos convergentes en el nivel de 200 hPa (laplaciano negativo) y movimiento vertical descendente. Regiones con potencial negativo muestran divergencia y movimientos ascendentes del aire. Así en regiones con convección profunda, el potencial de la velocidad es negativo, consistente con la divergencia en altura que producen las corrientes ascendentes. La NOAA produce mapas diarios para la detección del potencial de la velocidad, los cuales muestran también la salida de radiación infrarroja, lo que facilita la comprensión entre el potencial de la velocidad y los campos nubosos (Domex, 2011).

Los mapas de las anomalías del potencial de la velocidad utilizados en el artículo responden al nivel sigma .1682, lo que coincide aproximadamente con el nivel isobárico de 200 Hpa o 12 km de altura. Sigma es una coordenada vertical, definida como una razón de la presión en un punto de la atmósfera y la presión superficial bajo dicho punto.

- **Zonas de ceros y zonas de cambio de orden de magnitud** en las anomalías del potencial de la velocidad: las “zonas de ceros” se definen arbitrariamente en el estudio como el rango que va de -3.5×10^6 a 3.5×10^6 (m^2/s). Se procede así dado que los mínimos del campo por lo general exhiben valores cercanos a -1.2×10^7 (m^2/s) y los máximos alcanzan valores cercanos a 1.2×10^7 (m^2/s). Estas zonas de ceros por lo general resultan estrechas en mapas de extensión planetaria y recorren enormes distancias. Las zonas de cambio de orden de magnitud se definen arbitrariamente entre los rangos de $+8 \times 10^{-6}$ a $+1.2 \times 10^{-7}$ para los máximos del campo, y de -8×10^{-6} a -1.2×10^{-7} para los mínimos. En los mapas estas zonas tienden a verse como áreas extensas y algo redondeadas.
- **Número de onda zonal:** responde al número adimensional de longitudes de onda que caben en un círculo alrededor del planeta, sobre una latitud determinada. En este artículo se utiliza con relación a la latitud ecuatorial.
- **Isolíneas cero:** se refieren a las isolíneas de separación entre los valores positivos y negativos en los campos de las anomalías de la presión de las alturas geopotenciales y de las componentes del viento. Se utiliza como parámetro para la ubicación de los sismos.
- **Acople vertical:** significa que una condición se extiende por varios kilómetros de altura en forma aproximadamente vertical. Así, cuando se menciona por ejemplo que la isolínea de valor cero de una de las componente del viento se acopla con el sitio del epicentro, debe entenderse que existe una verticalidad aceptable entre un nivel inferior de la troposfera con otro superior.
- **Escala sinóptica:** es la escala de los sistemas de alta y baja presión de la atmósfera inferior cuyas dimensiones típicas van de 1.000 a 2.500 km, aproximadamente. Por ejemplo, un huracán es un disturbio típico de escala sinóptica.
- **Ondas largas tipo Rossby:** ondas en el viento de la troposfera superior en latitudes medias, que dibujan gigantescos meandros y están asociadas con sistemas de presión y corrientes en chorro en la troposfera superior. Por su tamaño, se las conoce también como ondas planetarias.
- **Momento angular atmosférico:** es una medida de qué tan rápido gira la atmósfera relativa a la tierra en rotación. El momento angular absoluto es la suma del momento angular relativo de la atmósfera, más el momento angular de la Tierra sólida. Hay otros aportes de momento angular como el de las mareas y

las corrientes marinas en los océanos que se consideran de mucha menor cuantía que el atmosférico.

- **Conservación del momento angular:** si no se aplican fuerzas externas sobre la Tierra sólida, la suma del momento angular de la Tierra sólida más el momento angular relativo de la atmósfera (momento absoluto) permanece constante a largo plazo (décadas, siglos). En plazos cortos como días, meses o años, la Tierra sólida y la atmósfera intercambian momento angular, por ejemplo, cuando los vientos oestes se aceleran durante el invierno del hemisferio norte aumentando su momento angular relativo, la Tierra sólida disminuye su momento, para que el momento absoluto permanezca constante.

3. DESARROLLO: CASOS DE ESTUDIO

3.1. El terremoto del Honshu, Japón - 11 marzo de 2011- caso de terremoto superficial

Para mostrar en extenso los acoples entre los campos troposféricos y la sismicidad, se utilizó el caso del terremoto de Japón del 11 de marzo de 2011 por dos razones: una, para exponer el abordaje metodológico que se sigue en los casos presentados más adelante y dos, por tratarse de un evento que sigue estando muy fresco en la memoria de la opinión mundial debido a los inmensos impactos humanos, ambientales y económicos, que produjo el megaterremoto y el gigantesco maremoto que este generó.

El terremoto de Japón aconteció a las 05:46 UTC del día 11 de marzo de 2011, localizado a 70 kilómetros al este de la península de Oshika, como lo muestra el punto rojo en la figura 1 izq. Alcanzó una magnitud de 9.0 Mw (escala de Magnitud de Momento), a una profundidad de 30 km. El

epicentro se localizó sobre la fosa del Japón, entre las placas tectónicas del Pacífico y la Euroasiática, lo que lo define como un evento interplaca.

El campo planetario de las anomalías del potencial de la velocidad en el nivel Sigma .1682 (aproximadamente 200 hPa, 12km de altura), para el periodo del 9-10 de marzo de 2011, mostraba número de onda zonal 2. El valor de la anomalía del campo sobre el sitio del sismo era de $-0.6e+06$ m²/s, lo que ubica el sitio del terremoto en la “zona de ceros” de dicho campo como se puede observar en la figura 1 der. En la sección de metodología, se ofrecen algunos aspectos sobre el potencial de la velocidad, utilizados en este estudio.

En este caso de estudio (y los demás que se analizaron), no solo cobra importancia la escala planetaria del potencial de la velocidad, sino también la escala sinóptica. Los acoples verticales de las anomalías troposféricas con el área del epicentro del terremoto en la escala sinóptica, iniciaron desde el día 8 de marzo, extendiéndose desde la troposfera baja hasta la troposfera alta. La configuración sinóptica que se acopló con el sitio del terremoto fue un eje de vaguada (eje de baja presión), que formaba parte de una onda larga tipo Rossby extendida en todo el espesor de la troposfera, la cual se mantuvo casi estacionaria con respecto al área epicentral entre los días 8 y 11 de marzo de 2011. El día 11 la onda medía alrededor de 100° de longitud de dorsal a dorsal sobre la latitud 40°N en el nivel de 500 hPa (5.5 km), tal como se observa en la figura 2 izq. arr. La onda estuvo contenida en la franja latitudinal 20°N-60°N aproximadamente y la línea roja a trazos muestra el eje de vaguada pasando casi sobre el epicentro del terremoto. Las líneas a puntos son los ejes de alta presión o dorsales. La onda larga dio origen a un área anómala de baja presión (B) sobre la zona del epicentro, Fosa de Japón, y dos zonas anómalas de alta presión (A), una sobre la placa del Pacífico y otra sobre la placa Euroasiática, como lo muestran las anomalías de las alturas geopotenciales en el

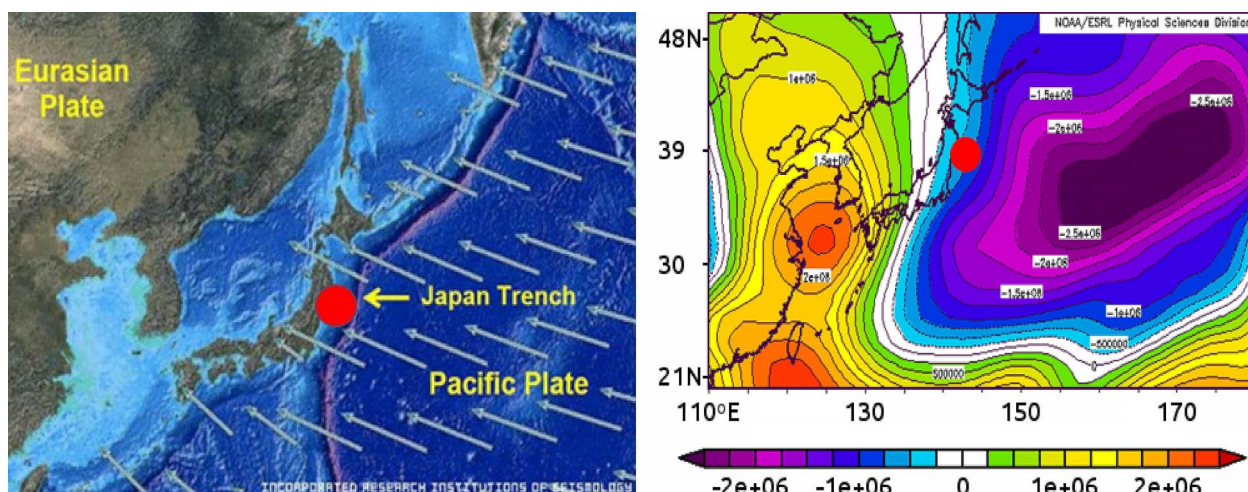


Figura 1. Izq: el punto rojo ubica la localización del epicentro del terremoto de Japón del 11 de marzo de 2011. Las flechas grises indican la dirección de movimiento relativo de la placa del Pacífico (Internet Geography, 2015). Der: mapa compuesto para las anomalías del potencial de la velocidad (m^2/s) en el periodo 9-10 de marzo de 2011, nivel Sigma .1682.

nivel de 500 hPa, en el periodo del 9 al 11 de marzo (figura 2 der. arr.).

En consonancia con las anomalías de las alturas geopotenciales en la escala sinóptica, las anomalías del viento formaron tres circulaciones: una con sentido antihorario sobre la fosa de Japón con centro sobre el epicentro del terremoto, como se ve en la figura 2 izq. ab., para el periodo 9-11 de marzo en el nivel de 500 hPa, y dos extensísimas circulaciones con sentido horario formadas sobre los dorsales de la onda larga, una sobre la placa tectónica del Pacífico y otra sobre la placa Euroasiática. El día del terremoto las tres circulaciones anómalas se extendieron en la vertical desde el nivel de superficie hasta el nivel de 30 hPa (22.5 km).

Se considera que las diferencias de presión entre las placas tectónicas mencionadas, más las tres circulaciones anómalas y sobre todo la circulación antihoraria sobre la fosa de Japón, dieron origen a torques que jugaron un papel importante en el disparo del terremoto y podrían considerarse como un mecanismo precursor capaz de contribuir al escape de gases y otras sustancias desde la litosfera previos al terremoto (Pulinets & Ouzounov, 2011).

Ya que las vaguadas son configuraciones sinópticas comunes en la atmósfera, podría argumentarse que lo apuntado hasta aquí es una mera casualidad en lugar de una interacción atmósfera-litosfera, sin embargo, en los casos analizados más adelante se encontraron acoples similares entre los eventos sísmicos y las configuraciones atmosféricas anómalas. Eso lleva a preguntarse ¿cuál es la probabilidad de encontrar con alta frecuencia, anomalías atmosféricas que cumplan ciertas características similares en los sitios en donde acontecen sismos de magnitud importante? En el desarrollo del presente trabajo se irá dando respuesta a este tipo de interrogantes.

En relación a lo anterior, existen estudios teóricos con modelaje que postulan la posibilidad de que el viento actúe como elemento capaz de producir desplazamientos de las placas tectónicas. Por ejemplo, Sidorenkov (2004) utilizando una velocidad común del viento de 10 m/s aplicada sobre una placa tectónica con superficie de $2 \times 10^{13} \text{ m}^2$, encontró que la fuerza atmosférica total aplicada era de aproximadamente 1×10^{13} Newtons. Bajo el efecto de esa fuerza, la placa interactúa con las placas circunvecinas a través de contactos frontales. La interacción toma lugar

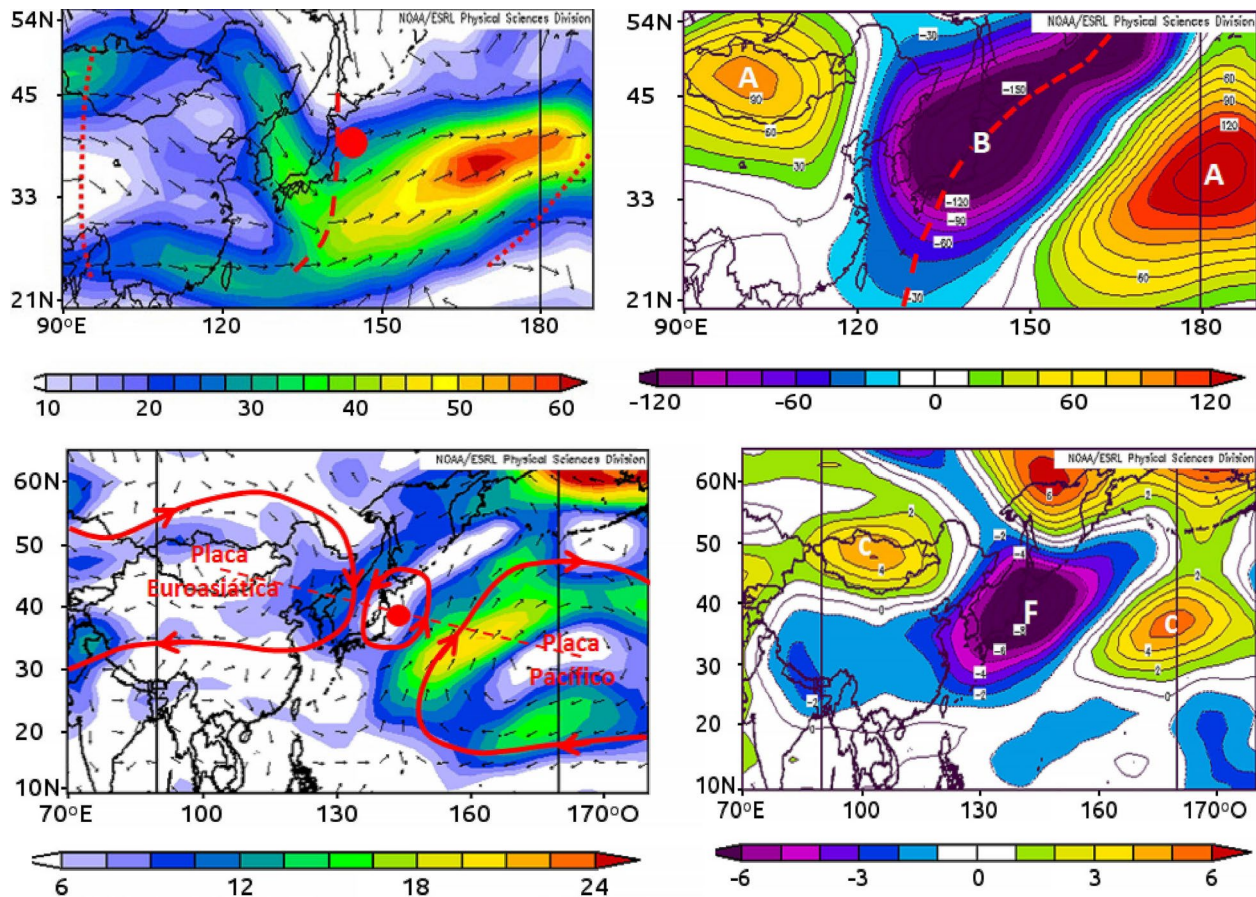


Figura 2. Izq. arriba: onda larga tipo Rossby en el vector viento (m/s) el día 11 de marzo de 2011 a las 06 UTC (el terremoto ocurrió a las 05:46 UTC), en el nivel de 500 hPa; la línea roja a trazos es el eje de va- guada y las líneas a puntos son los ejes de dorsal. Periodo 9-11 de marzo de 2011 en 500 hPa; der. arriba: anomalías de las alturas geopotenciales (m); izq. abajo: anomalías del viento (m/s); der. abajo: anomalías de la temperatura (°K).

solo en los sitios de adhesión de placas y el área de contacto puede ser pequeña, de tal forma que la fuerza atmosférica total se concentra en estas pequeñas áreas. Por tanto, los esfuerzos pueden alcanzar valores tan altos como $10^6 - 10^7 \text{ N/m}^2$ en esas áreas de contacto y disparar las ondas sísmicas. Así, propone Sidorenkov, la fuerza mecánica de la atmósfera y el océano sobre las placas que componen la litosfera, controlan el movimiento relativo de las placas y pueden causar los terremotos.

Llama la atención en este terremoto de Japón, que el epicentro se haya ubicado casi sobre el eje que conecta los dos centros anómalos de

circulación horaria sobre las placas del Pacífico y la Euroasiática (línea roja a trazos - figura 2 izq. ab.). La estructura térmica de la onda larga tipo Rossby y por ende de las circulaciones anómalas se muestran en la figura 2 derecha abajo, para el periodo 9-11 de marzo en el nivel de 500 hPa. Las circulaciones anómalas horarias son centros cálidos (C) y la circulación antihoraria es fría (F).

Para este terremoto de Japón, las anomalías de la componente meridional del viento desde la troposfera baja hasta la superior, fueron las que mejor se acoplaron con el epicentro desde varios días antes del terremoto. En horas cercanas al evento telúrico las anomalías zonales también se

acoplaron, o dicho en otras palabras, hubo una configuración más circular del viento sobre la Fosa de Japón, como se mostrará más adelante. En cuanto a las anomalías meridionales del viento en la troposfera media y superior, estas tendieron a acoplarse verticalmente con el área epicentral desde días antes del terremoto, mientras que en los niveles bajos solo se acoplaron bien hacia las últimas 30 horas como se puede observar en la figura 3, en donde se muestran las anomalías de la componente meridional en tres diferentes periodos y tres diferentes niveles troposféricos. Los periodos en las columnas son: 9/18UTC-10/06UTC, 10/06UTC-10/18UTC y 10/18UTC-

11/06UTC. Los niveles en las filas son: arriba 100 hPa (16 km), al medio 300 hPa (9 km) y abajo 850 hPa (1.5 km). Las flechas indican las direcciones hacia el norte y hacia el sur de la componente meridional del viento.

En los niveles de 100 y 300 hPa, se notan dos aspectos con mucha claridad: uno, que la isolínea cero de la componente meridional del viento se acopla bastante bien con el lugar del epicentro, desde el primer periodo de doce horas (9/18UTC-10/06UTC) hasta el momento del terremoto; y dos, que el epicentro se ubica entre dos extensísimas zonas en donde la componente

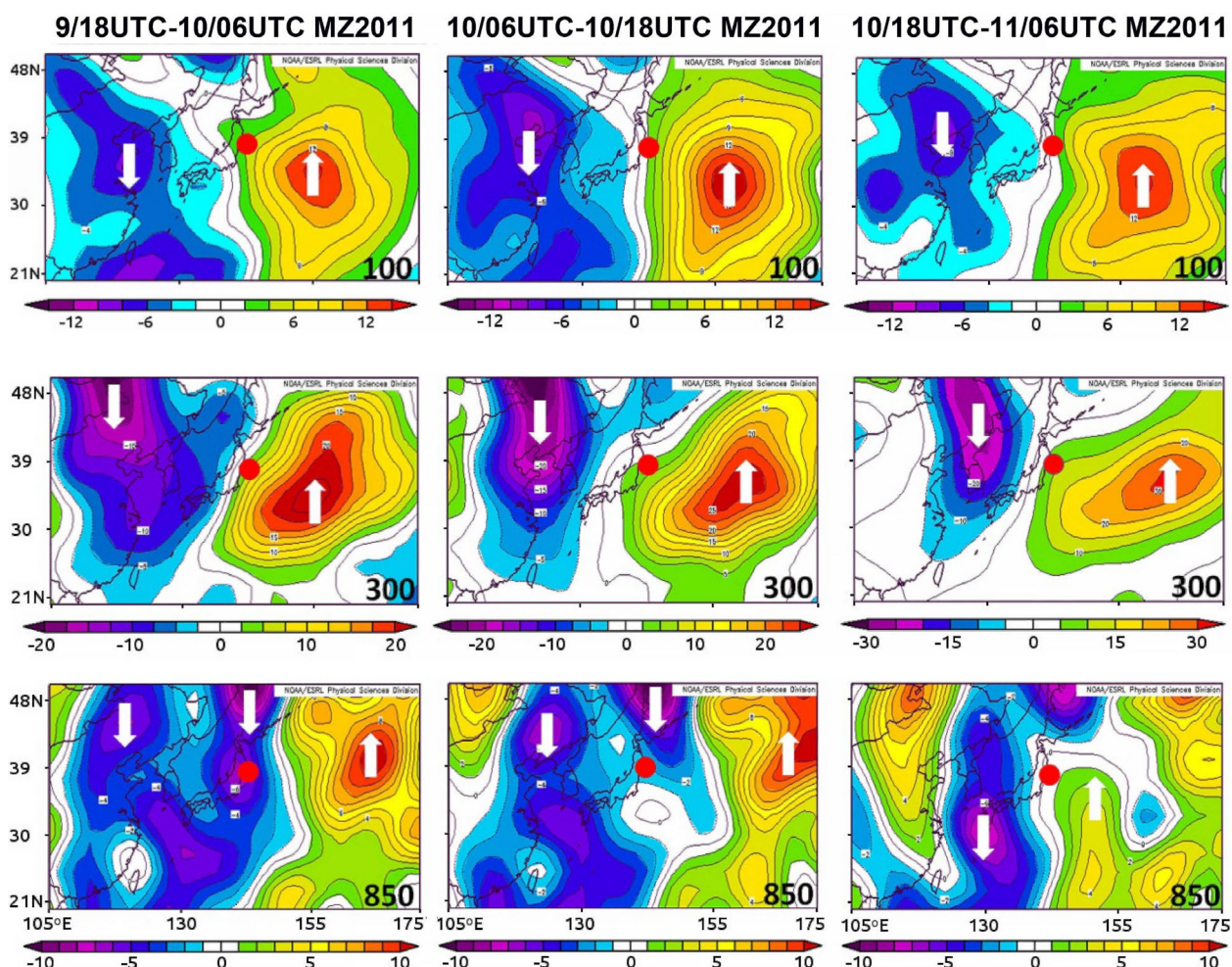


Figura 3. Anomalías de la componente meridional del viento (m/s) para tres niveles troposféricos (filas). Arriba: 100 hPa (16 km); en medio: 300 hPa (9km); abajo: 850 hPa (1.5km) y para tres periodos de tiempo indicados en la parte superior (columnas). Las flechas indican las direcciones hacia el norte y hacia el sur de las anomalías de la componente meridional del viento.

meridional del viento actúa de sur a norte sobre la placa tectónica del Pacífico y en sentido contrario sobre la placa Euroasiática. En el nivel de 850 hPa el comportamiento de la componente meridional es algo diferente; para el primer periodo de doce horas (9/18UTC-10/06UTC) el acople de la isolínea cero con el lugar del epicentro es algo pobre. Para el segundo periodo (10/06UTC-10/18UTC) se nota una mejoría en el acople y para el tercer periodo (10/18UTC-11/06UTC) que termina casi en el momento del terremoto, existe un acople bastante aceptable.

Otro elemento antes mencionado que resulta importante, es que la isolínea cero de las anomalías de la componente zonal del viento tendieron también a acoplarse con el epicentro del terremoto pocas horas antes del evento, como se muestra en la figura 4 para los niveles de 850, 300 y 100 hPa en el periodo 10/18UTC – 11/06UTC. Es notorio que el epicentro se ubicó cerca de dicha isolínea, en todo el espesor de la troposfera en horas cercanas al terremoto, ya que al norte del epicentro las anomalías de la componente zonal mostraron dirección de este a oeste, mientras que al lado sur mostraron sentido contrario. Por tanto, el comportamiento de ambas componentes del viento muestra un movimiento casi circulatorio al aproximarse el evento telúrico.

Resulta de mayor importancia mencionar, que las anomalías troposféricas encontradas en el terremoto de Japón en este estudio se corresponden bastante bien en tiempo y posición

geográfica con las anomalías en la emisión de radiación de onda larga previas a dicho evento, encontradas por Ouzounov et al. (2011) y mostradas en la figura 5. De acuerdo a Ouzounov y Freund (2004), estas anomalías se forman cuando las rocas se ven sometidas a elevados niveles de tensión debido a la actividad presísmica.

Por otra parte, Pulinets & Boyarchuk (2004), Molchanov et al. (2004) y Pulinets & Ouzounov (2011), entre otros, han trabajado con el “mecanismo de Acople Litosfera-Atmósfera-Ionosfera” (LAIC por sus siglas en inglés), describiendo la actividad presísmica y los eventos que se desarrollan en estas tres capas de la tierra previo a los terremotos. En forma resumida, este mecanismo propone la ionización del aire por el incremento en emanaciones de gas radón (y otros gases), desde la corteza terrestre en la vecindad de una falla tectónica activa. La emanación incrementada de radón desata una cadena de procesos físicos, los cuales conducen a cambios en la conductividad del aire y a la liberación de calor latente (incremento de la temperatura del aire) debido a la adhesión de moléculas de agua a los iones.

Las anomalías troposféricas encontradas en este trabajo para el caso del terremoto de Japón, parecen sustentarse bastante bien con el “mecanismo de acople Litósfera-Atmósfera-Ionósfera”, descrito en el párrafo anterior. La liberación del radón y otros gases en las fallas tectónicas en los días previos al terremoto,

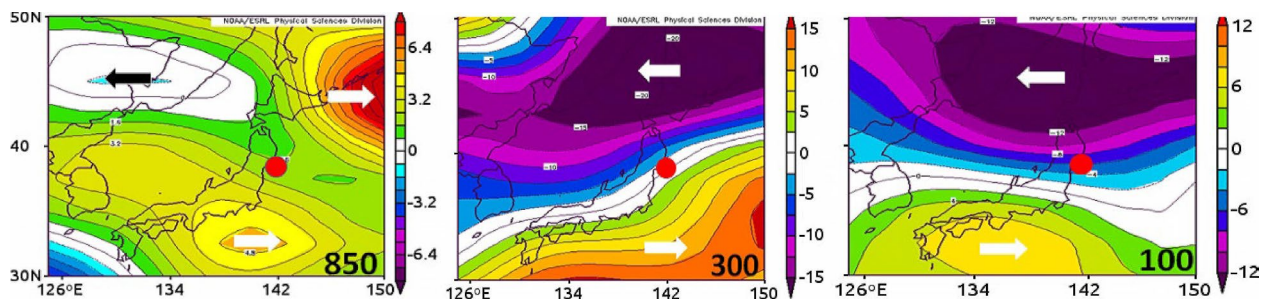


Figura 4. Anomalías de la componente zonal del viento (m/s) en el periodo 10/18 UTC – 11/06 UTC de marzo de 2011 en tres niveles troposféricos: lq.: 850; centro: 300; der: 100 hPa.

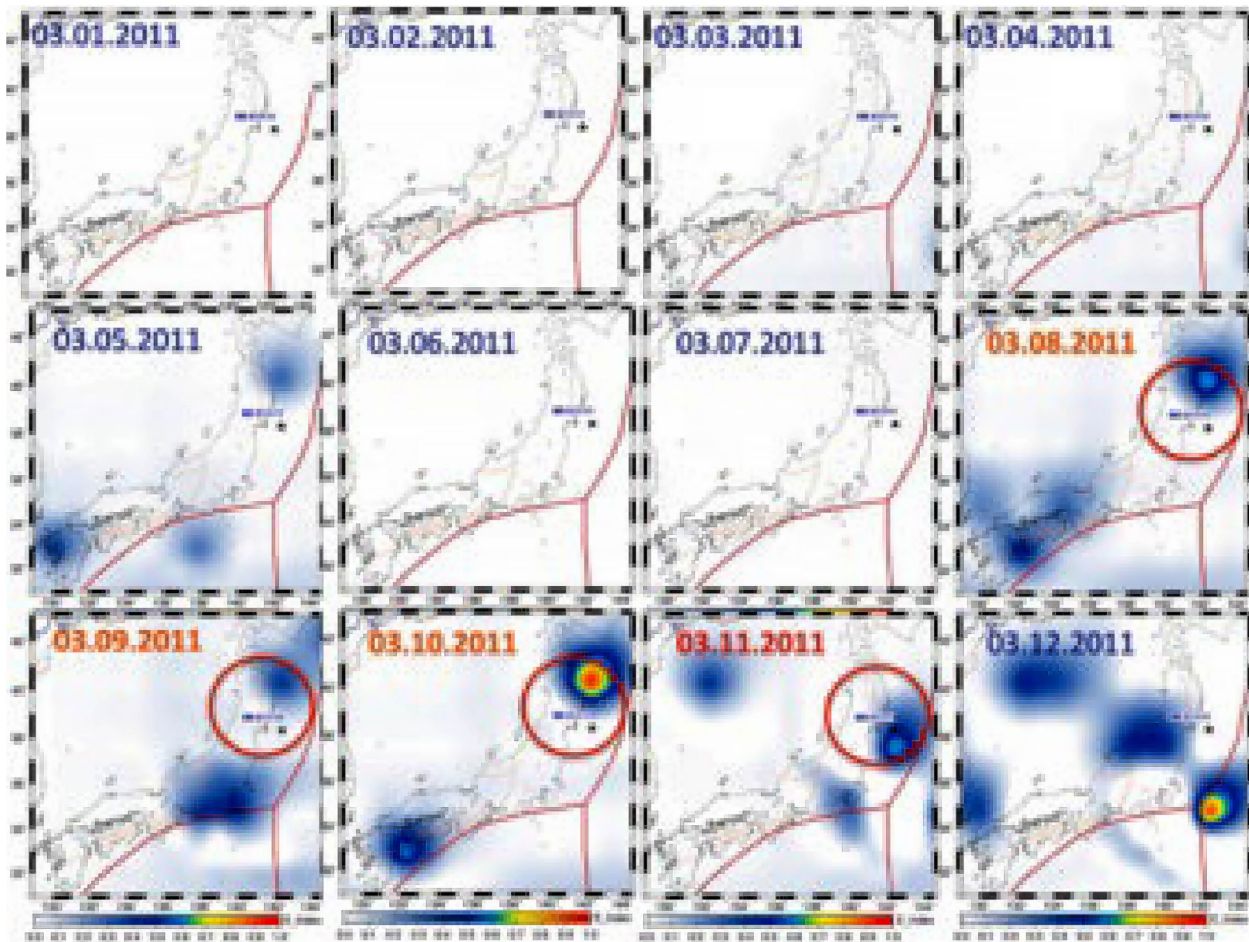


Figura 5. Serie temporal de las anomalías de Radiación de Onda Larga (OLR) observadas desde el satélite NOAA/AVHRR (06:30 TL- tiempo de cruce del Ecuador) para marzo 1-12, 2011. Los límites de placas tectónicas se indican con líneas rojas, las fallas mayores con líneas color marrón y la localización del terremoto con un punto sólido. Los círculos rojos muestran la localización espacial de las anomalías OLR en la vecindad del terremoto de Tohoku con magnitud 9.0 Mw. Fuente: Ouzounov et al. (2011) con autorización de Dimitar Ouzounov.

podría ser inducida por los movimientos de las placas tectónicas debido a las cargas de la presión atmosférica y a las circulaciones anómalas del viento sobre dichas placas, lo que convierte a la troposfera en una importantísima interfase para el mecanismo LAIC entre la litosfera y la ionosfera. Petrov y Boy (2004) encontraron, que la redistribución de las masas de aire debido a la circulación atmosférica causa deformación de la corteza de la tierra. Las deformaciones pueden alcanzar valores tan grandes como 20 mm en la componente vertical y 3 mm en la horizontal.

3.2. Acoples troposfera-litosfera durante las réplicas del terremoto de Japón

A lo largo de la preparación de este trabajo se encontró, que en la gran mayoría de los terremotos era posible identificar anomalías troposféricas tanto para los eventos sísmicos previos, como para sus réplicas. Atendiendo a ello, en el cuadro 1 se muestran las características de las anomalías troposféricas que se observaron para las réplicas del terremoto del 11 de marzo de 2011, con magnitudes ≥ 7.0 Mw, sin incluir las del día 11.

Cuadro 1. Réplicas del terremoto de Japón del 11 de marzo de 2011, con magnitudes ≥ 7.0 Mw sin incluir las del día 11. En rojo el terremoto del 11 de marzo de 2011

Fecha	Magnitud del sismo (Mw)	Latitud	Longitud.	Prof. del sismo (km)	Componente anómala del viento / tipo de circulación	Espesor de la anomalía atmósfera (km)	Duración de la anomalía atmosférica (horas)
11/03/2011	9.0	38.322°N	142.369°E	30	Zonal y meridional / antihoraria	22.5	72
07/04/2011	7.1	38.253°N	141.640°E	42	Zonal y Meridional / circulac. horaria	5.5	78
10/07/2011	7.0	38.040°N	143.287°E	23	Zonal / circulac. horaria	9.0	30
07/12/2012	7.3	37.8°N	144.2°E	36	Meridional / circulac. antihoraria	1.5	26
26/10/2013	7.1	37.170°N	144.665°E	10	Meridional / circulac. antihoraria	2	18

En la fila superior del cuadro 1 aparece el terremoto del 11 de marzo de 2011, para fines de comparación. A los datos sísmicos en el cuadro se agregaron los siguientes datos atmosféricos: la componente que mejor se acopló con el sitio del epicentro (zonal, meridional o ambas), en el periodo de “duración de la anomalía” señalado en el cuadro, el tipo de rotación de la anomalía (horaria o antihoraria), el espesor de la anomalía troposférica en kilómetros, medido entre dos niveles isobáricos y su duración en horas. Como se puede observar, el análisis de las réplicas arrojó los siguientes aspectos con respecto a las anomalías troposféricas encontradas: a) todas las réplicas se asociaron con circulaciones anómalas con sentido horario o antihorario, en alguna de las componentes del viento o en ambas; b) las anomalías troposféricas presentaron espesores verticales muy por debajo de aquella que presentó el terremoto del día 11 de marzo de 2011; c) los tiempos de persistencia de las anomalías troposféricas fueron bajos comparados con el evento del 11 de marzo, a excepción de aquella del 7 de abril de 2011. Estos hallazgos podrían interpretarse en dos sentidos: uno, que en una región tan sísmica como el área de la Fosa de

Japón, los acoples para el disparo de sismos con magnitudes cercanas a 7.0 Mw, no se manifiesten con anomalías atmosféricas muy intensas, o dos, que el evento sísmico principal del día 11, hizo que la situación geológica posterior al terremoto no requiriera anomalías atmosféricas de gran espesor vertical y persistentes durante los acoples. En todo caso, lo relevante es que las réplicas estuvieron asociadas con acoples entre la troposfera y la litosfera en forma semejante, aunque más débiles al evento principal del 11 de marzo de 2011.

3.3. Acoples troposfera-litosfera para otros casos de sismicidad

Con el fin de mostrar que resulta difícil considerar “casuales” los acoples troposfera-litosfera encontrados en el terremoto de Japón y sus réplicas, se analizaron otros casos de sismicidad en diversas regiones geográficas del planeta y con magnitudes variadas. Se analizaron tres megaterremotos (8.1 Mw o mayor), dos terremotos y un enjambre sísmico con magnitudes medidas pero no sentidas, siguiendo

metodologías similares pero no idénticas a la utilizada en el caso del terremoto de Japón. Lo que se pretende mostrar es la existencia de las anomalías troposféricas, independientemente de la metodología utilizada. Los datos de los sismos fueron obtenidos a través de la List of historical earthquakes (s.f.) y se organizan según la magnitud descendente de los eventos. Al final del apartado se presenta una tabla con el resumen de los principales hallazgos.

3.4. Terremoto de Valdivia – Chile

Este terremoto con magnitud de 9.5 Mw aconteció el 22 de mayo de 1960 y es el de mayor magnitud que se haya logrado medir instrumentalmente hasta el momento. Su epicentro se localizó en las coordenadas 38° 24' S, 73° 05' O - punto rojo en la figura 6 - y es conocido como el terremoto de Valdivia.

En el periodo del 20 al 22 de mayo, el campo planetario de las anomalías del potencial de la velocidad mostraba número de onda zonal 1 y un valor de $4.5e+06 \text{ m}^2/\text{s}$ sobre el área del terremoto, lo que ubica el sismo ligeramente alejado de la “zona de ceros” de dicho campo, pero no se

considera una desviación significativa. Desde el día 18 de mayo el epicentro se acopló con un eje de alta presión (dorsal), que corría semiparalelo a la Fosa de Perú-Chile, y era parte de una onda larga formada en la corriente en chorro en la troposfera media y superior. La estructura de onda larga para el día 22 de mayo puede verse en la figura 6 izq., en el mapa de las anomalías de las alturas geopotenciales para el nivel de 500 hPa. “La letra “B” señala las anomalías de baja presión sobre las vaguadas de la onda y la letra A señala el área de alta presión sobre el dorsal. Consistente con la distribución de las anomalías de las alturas geopotenciales, las anomalías del viento formaron rotaciones con sentido horario sobre las placas de Nazca y Suramérica, como lo muestra la figura 6 der., y el epicentro se ubicó próximo a la isolínea cero de las anomalías de la componente meridional del viento (línea amarilla en puntos) en el eje de la rotación antihoraria.

Los acoples troposfera-litosfera en este terremoto del hemisferio sur con alta presión en el área epicentral, son altamente semejantes a los encontrados con baja presión epicentral en el terremoto de Japón. Parece que más allá de si los acoples se dan con baja o alta presión atmosférica en la zona epicentral, lo importante en los disparos

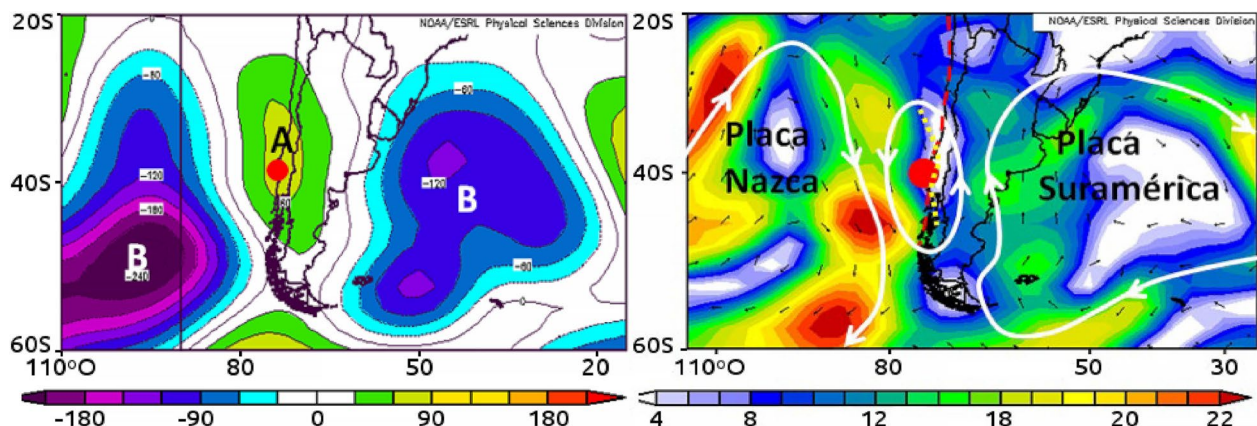


Figura 6. Nivel de 500 hPa para el 22 de mayo de 1960. Izq: anomalías de las alturas geopotenciales (m); B: baja presión, A: alta presión; el punto rojo identifica el epicentro del terremoto. Der: anomalías del viento (m/s); la línea roja a trazos sobre la costa oeste de Suramérica identifica la fosa Perú-Chile en forma aproximada entre las placas Nazca y Suramérica. La línea amarilla a puntos es la isolínea cero de la componente meridional del viento.

sísmicos, serían las fuerzas que se ejercen sobre las placas tectónicas producto de la distribución del viento y de la presión atmosférica.

3.5. Terremoto del Mar de Okhotsk - Rusia

Este terremoto tuvo lugar el 24 de mayo de 2013 a las 05:44 UTC. El hipocentro del terremoto se ubicó a 609 km de profundidad, siendo uno de los más profundos hasta ahora registrados, y es además, el terremoto de mayor magnitud conocida a esas profundidades con magnitud de 8.3 Mw. El epicentro se ubicó en las coordenadas $54^{\circ} 52' 26.4''$ N y $153^{\circ} 16' 48''$ E, como se muestra en el punto rojo de la figura 7.

Las anomalías del potencial de la velocidad en el periodo del 18 al 24 de mayo mostraron un número de onda zonal 2 algo desorganizado, y el valor del campo sobre el epicentro mostraba el valor de -0.5×10^6 m²/s, “zona de ceros” de dicho campo. Por su parte la escala sinóptica mostró una amplísima circulación anómala en sentido horario, en el periodo del 18 de mayo a las 06 UTC al 24 a las 06 UTC, con se puede ver en el mapa compuesto de las anomalías del viento en el nivel de 500 hPa (figura 7 izq.).

La circulación estuvo inmersa en una onda larga en la corriente del chorro polar que cubría parte de tres placas tectónicas: la Euroasiática, la de Norteamérica y la del Pacífico. En la vertical, la circulación anómala se extendió desde la troposfera baja hasta los 12 km de altura (200 hPa). La isolínea cero de las anomalías de la componente zonal del viento para el periodo y nivel troposférico antes mencionado, atravesó muy próxima al sitio del terremoto como se muestra en la figura 7 der. Al lado norte del epicentro las anomalías del viento actuaron de oeste a este sobre las placas Euroasiática y de Norteamérica, y al lado sur en sentido contrario sobre las placas del Pacífico, de Norteamérica y la Euroasiática. Este acople entre la troposfera y la litosfera estaría ligado a la ocurrencia del terremoto.

Es importante agregar, que la circulación anómala horaria (figura 7 izq.) es producto de un área de alta presión, la cual quedó rodeada por un “anillo” de zonas de baja presión en la troposfera baja y media (no se muestra), aspecto que pudo haber ayudado al desbalance de las placas tectónicas, actuando como macro factor bórico. En todo caso vale la pena poner atención al hecho de que la extensión geográfica de las anomalías del viento y de la presión atmosférica es sumamente extensa, lo cual podría estar ligado con la gran magnitud y profundidad del sismo.

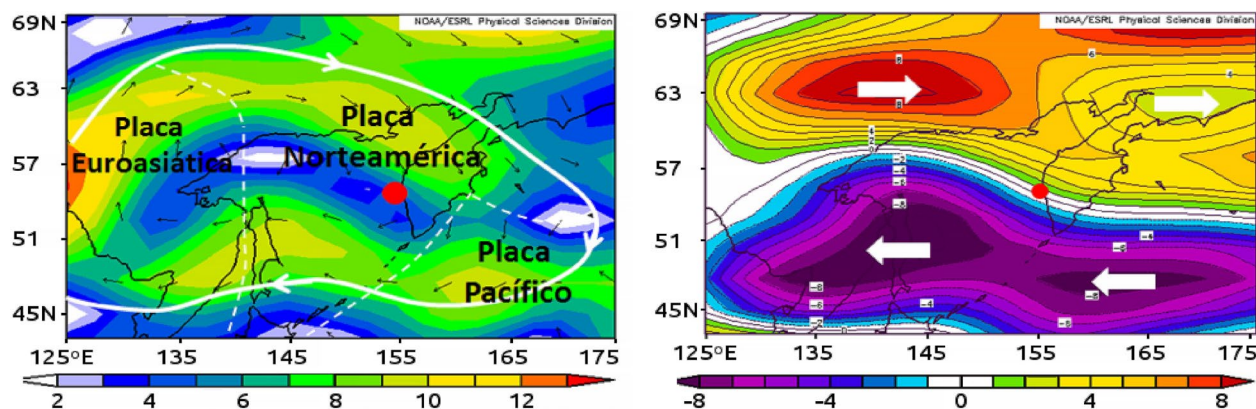


Figura 7. Nivel de 500 hPa en el periodo del 18/06 UTC al 24/06 UTC de mayo de 2013. Izq: circulación en sentido horario de las anomalías del viento (m/s). La línea blanca a trazos muestra la divisoria aproximada entre las placas tectónicas. Der: dirección de las anomalías de la componente zonal del viento (m/s).

3.6. Terremoto de Gujarat – India

Este terremoto con magnitud de 8.0 Mw tuvo lugar el 26 de enero de 2001. El epicentro se ubicó a lo interno de la placa de la India (23.419°N, 70.232°E) por lo que se contabiliza como terremoto intraplaca, aunque existe discusión científica sobre si el evento fue interplaca o intraplaca (Li et al., 2002).

Sobre el epicentro, las anomalías del potencial de la velocidad mostraron número de onda zonal 1 y un valor de $-8e+06$ m²/s, o sea, el evento telúrico tuvo lugar en la “zona de cambio orden de magnitud” de dicho campo, que como se había indicado con anterioridad es una de las dos zonas donde tienden a ubicarse los sismos. La corriente en chorro de la troposfera superior tuvo un desplazamiento hacia el norte, con respecto a su posición media para enero y a la vez se intensificó hacia la parte central de Pakistán y norte de la India (no se muestra). Por varios días previos al terremoto, se generó una profunda circulación en sentido horario en las anomalías del viento desde superficie hasta 300 hPa (9 km), al sur de la corriente en chorro.

El mapa compuesto de la figura 8 izq., para el nivel de 500 hPa durante el periodo del 20 al 25 de enero de 2001 (el terremoto fue el 26 a las 03:16 UTC), muestra lo amplísimo de la circulación anómala en sentido horario (H). El epicentro del terremoto quedó muy próximo al eje zonal de dicha circulación (línea blanca a puntos - figura 8 izq.). La raya blanca a trazos es la divisoria de la placa de la India con otras placas. La figura 8 der., para el mismo nivel y periodo antes mencionados, muestra que el epicentro se ubicó casi sobre la isolínea cero de las anomalías de la componente zonal del viento. Al norte del epicentro esta componente mostró sentido oeste-este y al sur mostró sentido opuesto. Se considera que el acople entre la troposfera y la litosfera jugó un papel importante en el disparo del terremoto.

Para ahondar en el comportamiento atmosférico en este caso de Gujarat, en la figura 9 se presenta el comportamiento del anticiclón antes mencionado, utilizando las anomalías del vector viento y de su componente zonal en el nivel de 400 hPa, en los siguientes periodos: 19-20, 22-23 y 24-25 de enero de 2011. En el periodo 19-20 se ve el centro de la extensísima circulación horaria (H) ubicado aproximadamente en el sureste de

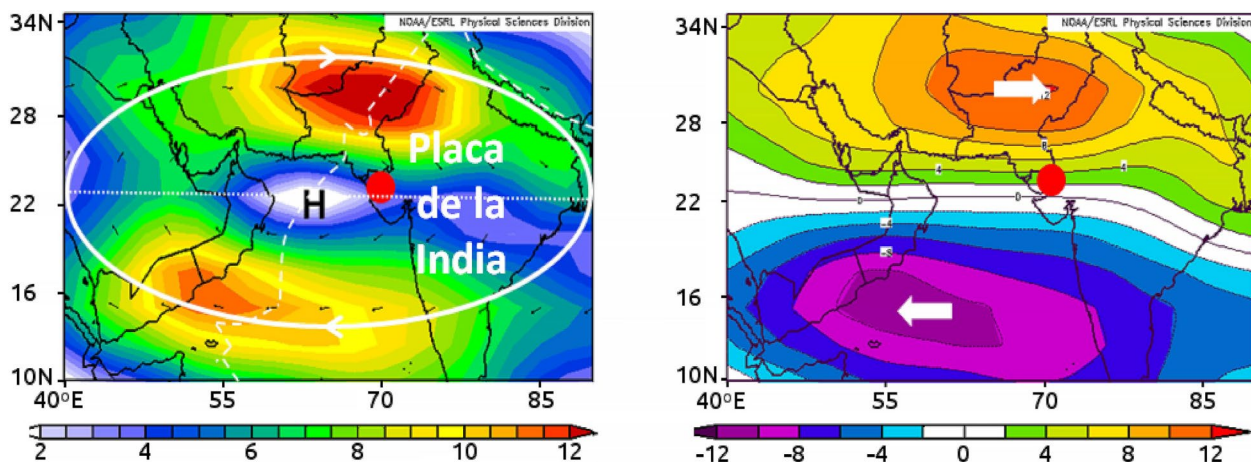


Figura 8. Mapas compuestos para el nivel de 500 hPa en el periodo del 20-25 de enero de 2001. Izq: amplísima circulación en sentido horario (H) de las anomalías del viento (m/s). La línea blanca a rayas muestra en forma aproximada los límites de la placa de la India con otras placas. La línea a puntos es el eje de la circulación. Der: anomalías de la componente zonal del viento (m/s) en el mismo nivel y periodo.

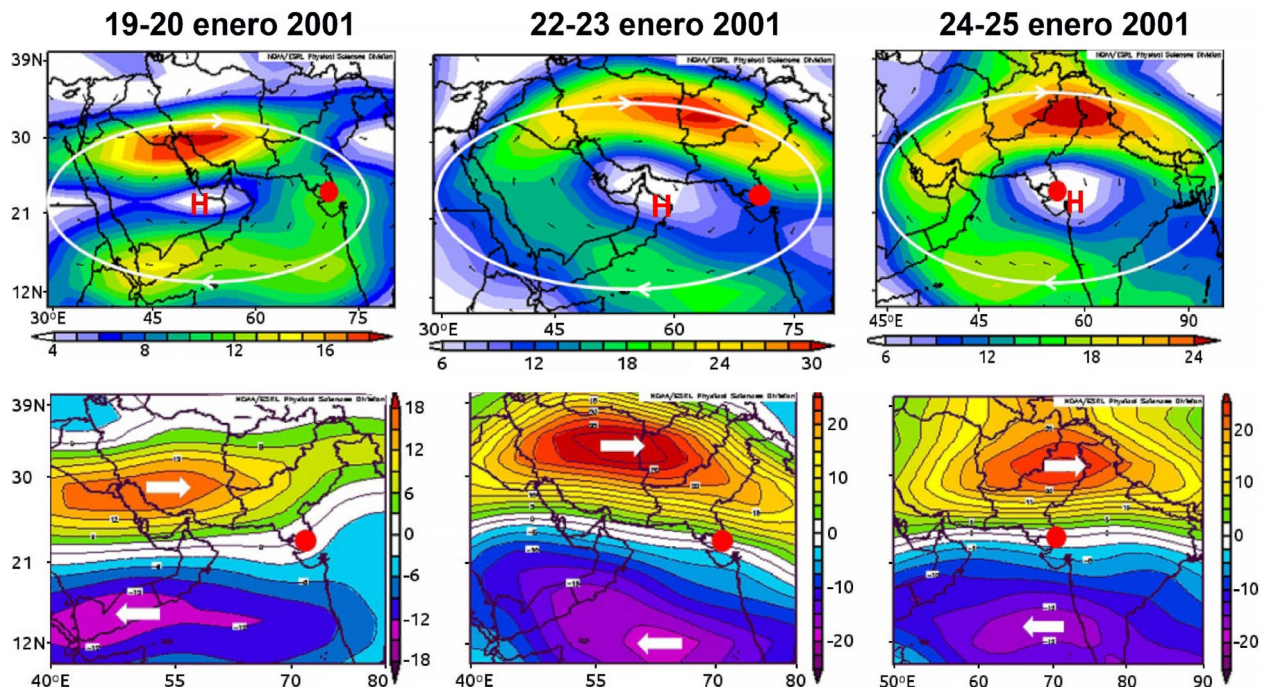


Figura 9. Nivel de 400 hPa en tres periodos diferentes identificados según las columnas: 19-20; 22-23; 24-25 de enero 2001. Fila superior: anomalías del viento (m/s), donde la H muestra el centro de la circulación anómala horaria. Fila inferior: anomalías de la componente zonal del viento (m/s).

Arabia Saudita (fig. 9 izq. arr.). La isolínea cero de las anomalías de la componente zonal del viento se ubicó muy cerca del epicentro desde ese periodo, unos seis días antes del terremoto (fig. 9 izq. ab.). Para el periodo 22-23 el centro de la circulación anómala se ubicó al noreste de Omán (fig. 9 centro arr.) y la isolínea cero seguía ubicada casi sobre el epicentro (fig. 9 centro ab.). En el periodo 24-25 el centro de la circulación anómala se ubicó sobre el epicentro del terremoto (fig. 9 der. arr.) y la isolínea cero seguía pasando sobre el epicentro (fig. 9 der. ab.). En este último periodo la circulación horaria era prácticamente circular sobre el epicentro, lo cual significa que este quedó sobre las isolíneas cero de las componentes zonal y meridional, lo que supondría un torque máximo gracias a esa acción casi circular del viento sobre las placas tectónicas durante ese periodo.

El terremoto se disparó en los momentos en que las anomalías del viento alcanzaron mayor

circularidad sobre el epicentro, después de varios días en que la placa de la India y las placas adyacentes a esta estuvieron sometidas a esfuerzos de cizalladura zonal prolongados. Este acople entre la troposfera y la litosfera es altamente similar a los antes presentados, lo que va confirmando un patrón en el disparo de las sismicidad.

Para este terremoto de Gujarat, Ouzounov y Freund (2004), utilizando datos MODIS de los satélites AQUA y TERRA, buscaron correlaciones entre los procesos de la dinámica atmosférica y la tierra sólida previos al terremoto. Analizaron datos de la temperatura superficial de la tierra y emisiones infrarrojas nocturnas desde la tierra. Encontraron un fuerte incremento en la temperatura superficial de la tierra en el área cercana al epicentro, que inició hacia los días 20-21 de enero (5-6 días antes del terremoto), el cual fluctuó rápido y se disipó pocos días después del

evento sísmico, lo cual sucede cuando las rocas se ven sometidas a elevados niveles de tensión debido a la actividad presísmica. Esto parece estar en buen arreglo con las anomalías troposféricas encontradas en este trabajo, las cuales inician también alrededor del día 20 de enero.

3.7. Terremoto de Wenchuan (o Sichuan) – China

Conocido como el terremoto de Wenchuan o Sichuan, este terremoto con magnitud de 8.0 Mw tuvo lugar en China ($31^{\circ}01'16''\text{N}$ $103^{\circ}22'01''$), el 12 de mayo de 2008. El epicentro quedó localizado en la “zona de ceros” de las anomalías del potencial de la velocidad con un valor de $-0.2\text{E}+06$ (no se muestra). Para este evento Liu et al. (2011) encontraron una fluctuación importante en el contenido diferencial del total de electrones en la ionosfera (dTEC del inglés), el día 12 de mayo.

La estructura vertical de la atmósfera mostró un acople aceptable desde la troposfera baja hasta la alta, en las anomalías de la componente zonal del viento, tal como se ve en la figura 10 para los niveles de 700, 200 y 70 hPa (3, 12 y 18.5 km de altura, respectivamente). El evento sísmico se asoció con una onda larga en el chorro subtropical, que dejó el epicentro ubicado sobre un área de divergencia en la componente zonal del viento. La divergencia zonal actuó por más de 50 horas sobre la placa Euroasiática y se acopló verticalmente desde la

troposfera baja hasta los 18.5 km de altura (70 hPa). Este acople resulta diferente a los antes vistos, y debe entenderse como la aplicación de fuerzas del viento en sentido contrario sobre la litosfera con respecto a una región, en este caso aquella a lo largo de la isolínea cero.

3.8. Enjambre sísmico en las Islas Canarias - España

Este enjambre se presentó entre las 22 y 23 UTC del día 12 de enero de 2015 y se ubicó entre las islas de Tenerife y Gran Canaria ($28^{\circ}\text{N}/29^{\circ}\text{N}$ y $16^{\circ}\text{O}/17^{\circ}\text{O}$), porción noroeste de la placa tectónica de África, por lo que se considera sismicidad intraplaca. Los sismos apenas alcanzaron magnitudes entre 1.8 y 2.6 en la escala de Richter, sin embargo las anomalías atmosféricas siguieron el mismo patrón que los sismos con magnitudes grandes.

En el periodo del 10 al 12 de enero, el campo de las anomalías del potencial de la velocidad mostraba un valor de $-1.5\text{e}+06$ m^2/s sobre el área del enjambre y número de onda zonal 1, por lo que el enjambre se ubicó en la “zona de ceros” de dicho campo. En superficie en la escala sinóptica, se observó un área de baja presión en las anomalías de la presión que se fue acercando desde el sur hacia el área del enjambre, hasta que la isolínea de valor cero de esa variable alcanzó el archipiélago de las Canarias el día de los sismos (no se muestra).

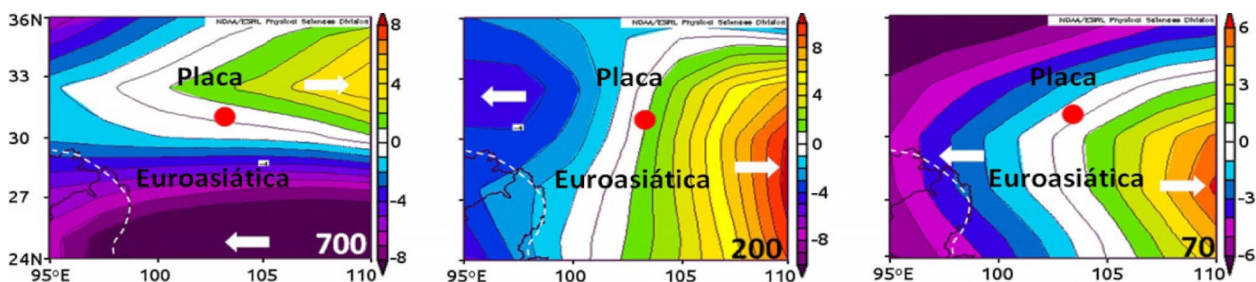


Figura 10. Anomalías de la componente zonal del viento (m/s) para el 12 de mayo de 2008 en tres niveles troposféricos: izq: 700; centro: 200 y der: 70 hPa. La línea blanca a trazos en el extremo inferior izquierdo es la divisoria aproximada entre la placa Euroasiática y la de la India.

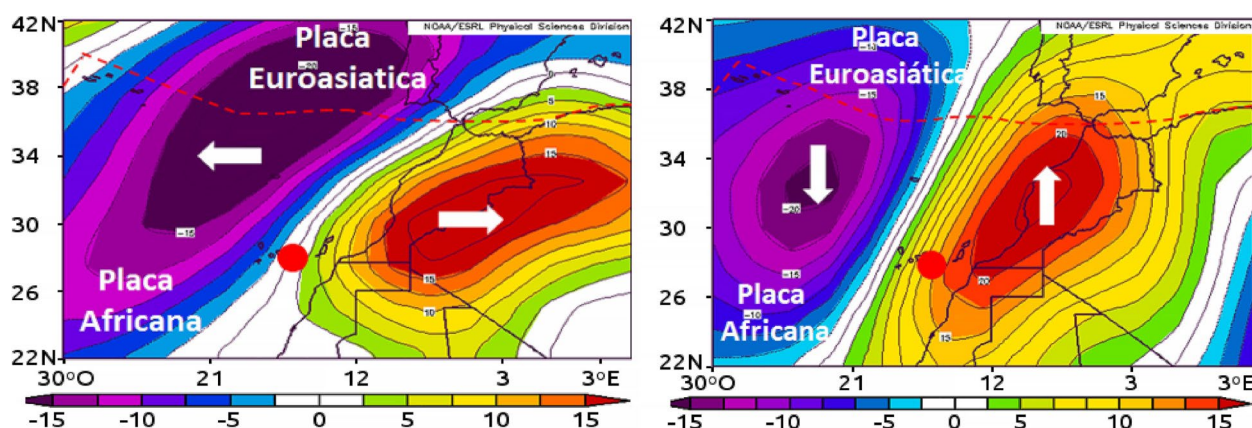


Figura 11. Capa atmosférica 850-200 hPa en el periodo 10-12 de enero de 2015. Izq: anomalías de la componente zonal del viento (m/s) y der: anomalías de la componente meridional (m/s). La línea roja a trazos es la divisoria aproximada entre la placa tectónica Euroasiática y la Africana.

Entre los días 7 y 8 de enero, una vaguada de altura de latitudes medias penetró hasta latitudes tropicales y produjo una baja presión segregada que se ubicó casi estacionaria sobre las Islas Canarias. Se generó una circulación anómala antihoraria con un espesor vertical de 13.5 km, durante unas 70 horas antes del enjambre sísmico. La figura 11 izq., muestra el mapa compuesto para las anomalías de la componente zonal del viento en la capa troposférica 850-200 hPa en el periodo 10-12 de enero, mientras que en el lado derecho se ven las anomalías de la componente meridional en el mismo periodo y capa atmosférica. Lo que se muestra es la acción de una profunda circulación anómala antihoraria, actuando en un periodo prolongado sobre el noroeste de la placa Africana, bastante acoplada con la zona del enjambre sísmico.

En los casos analizados anteriormente, las anomalías troposféricas fueron similares en magnitud a las de este caso. Lo que resulta muy diferente es la débil magnitud de los sismos, lo que puede ser producto de que el área del enjambre es una cuenca sedimentaria de un margen continental pasivo, que se caracteriza por su baja actividad sísmica (Alfonso, 2014). Esto indicaría que los acoples troposfera-litosfera son muy similares, independientemente de la magnitud de la sismicidad.

3.9. Resumen para los anteriores casos de sismicidad

En el cuadro 2 se presenta el resumen de los principales aspectos de los cinco casos de sismicidad analizados anteriormente, comparándolos con el de Japón del 11 de marzo de 2011.

De los datos contenidos en el cuadro 2 se desprende, que el fuerte y profundo terremoto del Mar de Okhotsk (609 km) no presenta enormes diferencias en cuanto a las características de las anomalías atmosféricas de los otros eventos sísmicos, con hipocentros de 40 km o menos de profundidad.

Por otra parte, llama la atención que en la sismicidad medida pero no sentida del enjambre sísmico de las Islas Canarias, el espesor vertical de las anomalías del viento y la duración de las mismas, son relativamente similares con aquellas de los megaterremotos y los terremotos, lo que hace suponer que sucede de esa forma porque se trata una cuenca sedimentaria de baja actividad sísmica. Además, las anomalías atmosféricas y sus duraciones operan en forma similar para la sismicidad interplaca e intraplaca. Por su parte, el giro horario o antihorario de las anomalías del viento, no parece ser elemento definitorio en las magnitudes de los eventos. Lo que sí tienen en

Cuadro 2: resumen de los acoples entre anomalías atmosféricas con sismicidad extrema, fuerte y débil

País o lugar	Fecha	Magnitud terremoto (Mw)	Profundidad terremoto (km)	Espesor de la anomalía del viento (km)	Duración de la anomalía de la componente del viento (horas)	Componente anómala del viento / tipo rotación	Placas tectónicas que intervienen
Japón, Honshu	11/03/2011	9.0	30	22.5	72	Zonal y meridional / antihoraria	Euroasiática y Pacífico (interplaca)
Valdivia, Chile	22/05/1960	9.5	33	16	120	Meridional / antihoraria	Nazca y Suramérica (interplaca)
Mar de Okhotsk, Rusia	24/05/2013	8.3	609	13.5	78	Zonal / horaria	Pacífico y Norteamérica (interplaca)
Gujarat, India	26/01/2001	8.0	16	12	144	Zonal y meridional / horaria	India (intraplaca)
Wenchuan, China	12/05/2008	8.0	19	21	54	Zonal / punto inflexión	Euroasiática (intraplaca)
Enjambre sísmico, islas Canarias, España	12/01/2015	Entre 1.8 y 2.4 (Richter)	Entre 30 y 40	16	96	Meridional y zonal / antihoraria	Placa Africana (intraplaca)

común todos los eventos, es que las anomalías atmosféricas superan el espesor de 12 km y la duración de las mismas son mayores a 50 horas (dos días) al menos.

Un aspecto relevante que no se recoge en los seis eventos sísmicos presentados en el cuadro 2 pero sí en el texto, es que las circulaciones anómalas horarias y antihorarias en cinco de ellos se formaron en los dorsales y vaguadas de las corrientes en chorro de la troposfera media y superior. Esto señala la importancia que tendrían estas corrientes de viento de alta velocidad con respecto a la sismicidad. De hecho, buena parte del momento angular transportado desde los trópicos alimenta dichas corrientes en latitudes medias, en donde Sasorova (2013) encuentra los máximos de sismicidad mundial.

Hasta aquí resulta sorprendente que los mecanismos que parecen ligar las anomalías troposféricas con la sismicidad de muy diferentes magnitudes, sean bastantes similares.

3.10. Conectividad planetaria temporal entre anomalías troposféricas y sismicidad

Resulta normal escuchar que la gente pregunte a los expertos si un sismo de magnitud importante que aconteció en la costa oeste de Norteamérica, por ejemplo, está relacionado con otro también importante que aconteció tres días después en Nueva Zelanda. La respuesta siempre es: “no, no hay ninguna relación”. Sin embargo, desde el punto de vista atmosférico, y a través del campo planetario

de las anomalías del potencial de la velocidad, sí es posible establecer relación temporal entre sismos que acontecen muy alejados entre sí.

Cuando se analizó el terremoto de Japón del 11 de marzo de 2011, se mencionó que los sismos tienden a ubicarse preferiblemente en dos tipos de zonas: uno, la “zona de ceros” del campo planetario de las anomalías del potencial de la velocidad, que se extienden por enormes distancias sobre la tierra, y dos, “zonas de cambio de orden de magnitud” de dicho campo que resultan ser zonas generalmente

redondeadas. Para comprender la idea de la “temporalidad sísmica”, se utilizan los sismos listados en el cuadro 3 los cuales están ordenados por fecha. Los sismos aparecen transcritos en la figura 12, la cual muestra el mapa compuesto del campo de las anomalías del potencial de la velocidad, con número de onda zonal 2, para el periodo del 4 al 10 de diciembre de 2015. Este mapeo es posible ya que del 4 al 10 de diciembre dicho campo mostró una similitud relativamente aceptable. Los puntos rojos son las ubicaciones de los sismos ≥ 5.0 Mw, excepto aquellos del Caribe,

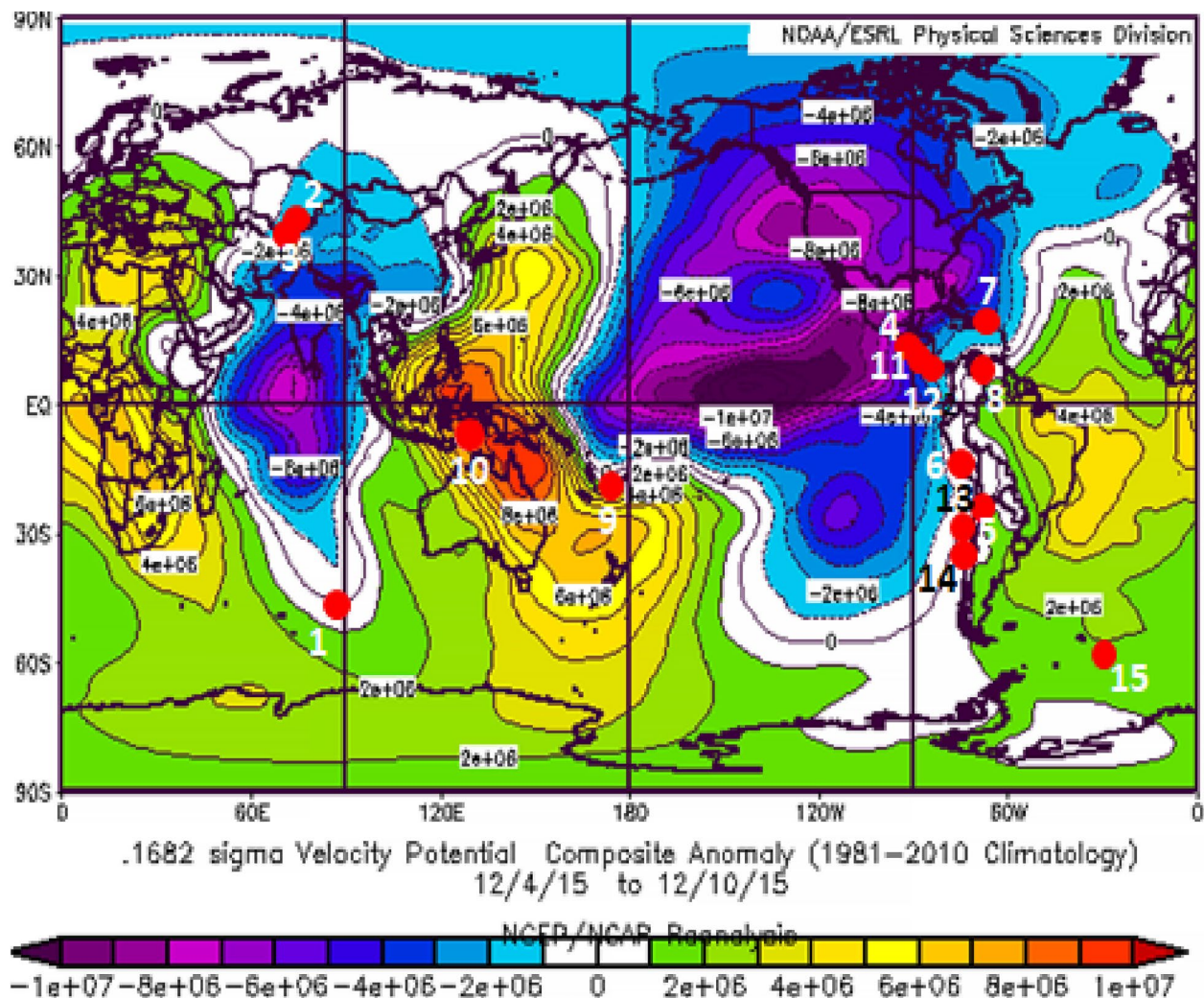


Figura 12. Mapa compuesto de las anomalías del potencial de la velocidad (m²/s) en el nivel Sigma.1682 con número de onda zonal 2 para el periodo del 4 al 10 de diciembre de 2015. Los puntos rojos numerados son sismos ≥ 5.0 Mw en ese periodo, excepto los del Caribe, Centroamérica y Suramérica que incluyen algunos eventos de menor magnitud.

Cuadro 3. Sismos ≥ 5.0 Mw excepto aquellos en el Caribe, Centroamérica y Suramérica que incluyen algunos eventos de menor magnitud (USGS, science for a changing world, s.f.).

Fecha	País o lugar / No. en el mapa	Lat.	Long.	Magnitud (Mw)	Profundidad del sismo (km)
04-dic-15	Dorsal del sureste de la India (1)	47.61°S	85.09°E	7.1	35
07-dic-15	Kirguistán (2)	41.73°N	74.60°E	5.5	22
07-dic-15	Tayikistán (3)	38.21°N	72.77°E	7.2	22
07-dic-15	Guatemala (4)	14.21°N	90.89°O	5.7	84
08-dic-15	En el mar Coquimbo Chile (5)	30.80°S	71.75°O	5.6	25
08-dic-15	Perú (6)	15.820°S	71.879°O	4.8	13.6
09-dic-15	Puerto Rico (7)	19.171°N	66.528°O	3.3	31
09-dic-15	Venezuela (8)	8.629°N	71.382°O	4.4	10
09-dic-15	Región Islas Fiji (9)	16.73°S	175.24°E	6.1	10
09-dic-15	Mar de Banda (10)	04.11°S	129.50°E	6.9	21
10-dic-15	Nicaragua (11)	11.212°N	86.797°O	4.7	33.4
10-dic-15	Costa Rica (12)	9.83°N	85.591°O	4.6	18.6
10-dic-15	Argentina (13)	23.834°S	66.836°O	4.3	191
10-dic-15	Bio-Bio Chile (14)	35.88°S	73.27°O	5.5	10
10-dic-15	Islas Sandwich del Sur (15)	58.88°S	23.91°O	5.7	10

Los números a la par del país o lugar son para orientación en la figura 12.

Centroamérica y Suramérica, que incluyen algunos valores menores. En lugares donde hubo varios sismos en el mismo sitio o sitios muy próximos en ese periodo, se tomó solamente el de mayor magnitud por facilidad de presentación.

En la figura 12 se puede observar, que todos los sismos (puntos rojos numerados) se ubican en la “zona de ceros” del campo, y el sismo en el Mar de Banda se ubica en la “zona de cambio de orden de magnitud” ($9e+06 \text{ m}^2/\text{s}$). Estos hallazgos llevan a una consideración muy importante: si bien el alto porcentaje de la sismicidad mundial diaria se ubica a lo largo de los bordes de las placas tectónicas oceánicas y continentales (UPSeis - an educational site for budding seismologists, s.f.), también se ha notado repetidamente en este trabajo que eso sucede cuando las “zonas de ceros” o las “zonas de cambio de orden de magnitud” de las anomalías del potencial de la velocidad en la troposfera alta, cortan dichas fallas o corren a lo largo de ellas. Esta condición tan singular del campo de las anomalías del potencial de la velocidad, es la que establece conectividad

temporal entre sismos cuyos epicentros se ubican a distancias enormemente grandes. Y como corolario, parece que el acople troposfera - tierra sólida es algo inherente a la sismicidad mundial.

Si bien el campo de las anomalías del potencial de la velocidad conecta la temporalidad sísmica a nivel planetario, este necesita de la colaboración de agentes de menor escala no necesariamente conectados entre sí, para disparar la sismicidad en áreas puntuales específicas (zonas epicentrales). Esos agentes son aportados por la escala sinóptica, cuyas dimensiones espaciales y temporales cubren áreas geográficas limitadas. Para ilustrar esto con dos ejemplos de la figura 12, se utilizan los sismos del 4 de diciembre en el dorsal del sureste de la India (1) y los sismos de Nicaragua y Costa Rica (11 y 12) del día 10 de diciembre.

El epicentro del sismo del dorsal del sureste de la India (1), con magnitud de 7.1 Mw, quedó ubicado hacia el centro de dos enormes circulaciones anómalas (figura 13 izq., nivel de 500 hPa, periodo 3-4 de diciembre); una circulación horaria (H)

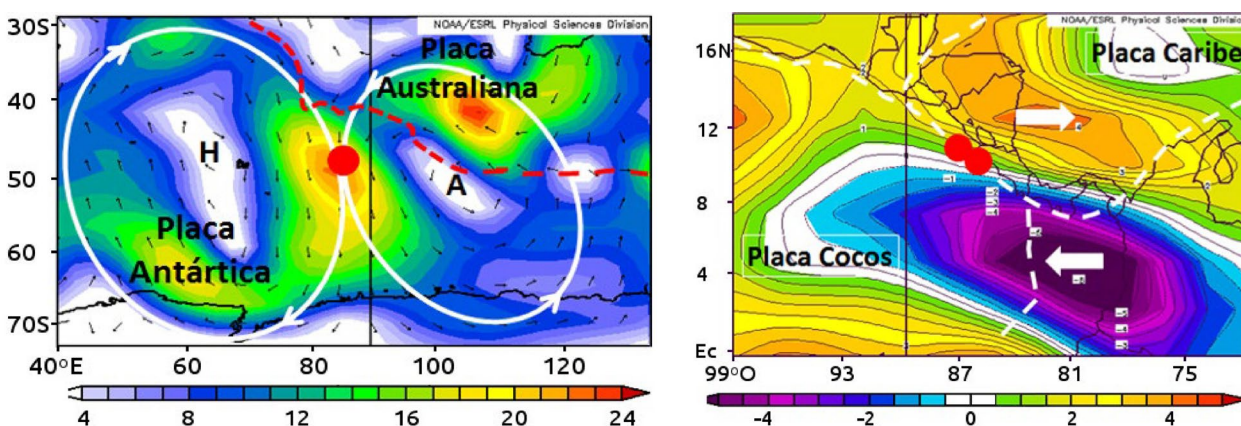


Figura 13. Izq: anomalías de viento (m/s) para el periodo 3-4 de diciembre de 2015, en el nivel de 500 hPa, en la zona del dorsal del sureste de la India. La línea roja a puntos es la divisoria aproximada de la placa Australiana y la Antártica. Der: anomalías de la componente zonal del viento (m/s) sobre Centroamérica en 850 hPa, en el periodo 9-10 diciembre 2015. La línea blanca a trazos es la divisoria aproximada de las placas de Cocos y el Caribe.

dominando la placa Antártica mayormente y otra antihoraria (A), actuando sobre las placas Antártica e Indoaustraliana, las que se extendieron en la vertical desde la troposfera baja hasta los 16 km de altura (100 hPa). Como en el hemisferio sur una circulación antihoraria se corresponde con anomalías positivas de la presión y del geopotencial, y una horaria se corresponde con anomalías negativas, el epicentro del sismo se ubicó cerca de la isolínea cero de dichas anomalías. De nuevo la troposfera y la litosfera se acoplaron para el disparo del sismo.

En el caso de los sismos de Nicaragua y Costa Rica con magnitudes de 4.7 y 4.6 Mw, respectivamente, las anomalías de la componente zonal del viento en la troposfera baja actuaron de este a oeste sobre la placa Cocos al lado sur de los sismos, y en sentido contrario sobre la placa Caribe, como lo muestra la figura 13 der., en el nivel de 850 hPa (1.5 km), en el periodo 9-10 de diciembre. Las anomalías del viento fueron el resultado de una amplísima zona de baja presión sobre Norteamérica, que penetró hasta el Mar Caribe y la parte central y norte de Centroamérica, más otra zona ecuatorial de baja presión al sur de Centroamérica. Debe indicarse que en los muchísimos casos revisados para este estudio, en el trópico profundo se

nota que en general las anomalías troposféricas tienden a circunscribirse a la troposfera baja, aún para sismicidad de valores importantes.

Lo anterior lleva a postular, que la troposfera se acopla a nivel planetario con la litosfera en el disparo de los sismos, vía el campo del potencial de la velocidad, y de allí que eventos sísmicos acontecidos en localidades muy distantes entre sí en tiempos similares, estarían interconectados de esta manera. Sin embargo, los acoples simultáneos de la troposfera con la litosfera para dos o más sismos en la escala sinóptica, solo se manifiestan si suceden en zonas geográficas muy cercanas como en el caso de lo mostrado para Costa Rica y Nicaragua.

3.11. Mecanismo de acople Troposfera-Litosfera (TL)

A partir de lo presentado hasta aquí, se propone un mecanismo de acople Troposfera-Litosfera, para lo cual es útil agrupar los artículos bibliográficos utilizados. Un primer grupo de artículos mostró anomalías ionosféricas repetidamente observadas y cuantificadas, como precursores de eventos sísmicos en variadas zonas del planeta.

Un segundo grupo enfocó el papel de las ondas largas en latitudes medias en el transporte del momento angular desde latitudes bajas hacia latitudes mayores, proceso que alimenta las corrientes en chorro de la troposfera media y alta. Un tercer grupo de artículos mostró que los terremotos intensos se reflejan en las variaciones del momento angular de la tierra y por tanto en la Longitud del Día, siendo conocido que la causa dominante en las anomalías en la rotación de la tierra en plazos diarios, semanales o estacionales, proviene de la transferencia del momento angular atmosférico (Volland, 1996).

A partir de lo anterior y lo mostrado a lo largo del trabajo, se propone aquí el siguiente mecanismo para el acople Troposfera-Litosfera (Mecanismo TL): *“anomalías troposféricas en la presión atmosférica y en el viento, que actúan sobre vastísimas áreas geográficas como parte de la circulación general de la atmósfera y que ocupan grandes espesores verticales durante varios días, se acoplan con las áreas epicentrales de los eventos telúricos antes y durante el “disparo” de la energía sísmica, que los procesos geológicos han ido acumulando en periodos de unos pocos años, décadas o centurias”.*

Un aspecto importante de este mecanismo de acople TL, es que no se opone en nada y más bien se complementa perfectamente con el “mecanismo de acople Litósfera-Atmósfera-Ionósfera” (LAIC por sus siglas en inglés), utilizado en Pulinets & Boyarchuk (2004); Molchanov et al. (2004) y Pulinets & Ouzounov (2011), expuesto con anterioridad. Las anomalías troposféricas de la presión y el viento descritas en este artículo, serían la interface perfecta que complementa el mecanismo LAIC. Ello porque los acoples Troposfera-Litosfera (TL) que actúan por muchas horas previo a los sismos, serían la razón principal para la liberación del gas radón y otros gases que actúan sobre la ionosfera, debido a las fuerzas mecánicas que ejercen las anomalías de la presión y el viento, sobre las placas tectónicas para que

se produzca la liberación de dichos gases. O sea, el mecanismo TL proporciona una interface necesaria, la troposfera, para la conexión entre la litosfera con la ionosfera.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Lo observado en este trabajo parece despejar las dudas de que existan acoples suficientemente claros entre la troposfera y la litosfera, unos días antes y durante el disparo de los sismos de toda magnitud y en todo el planeta. Sin embargo, no queda claro cuál de estas capas inicia o comanda el proceso de acople. Parece más bien que se trata de un proceso permanente de acople entre la troposfera y la litosfera, pero cambiante de acuerdo a la dinámica propia de ambas capas para los intercambios de energía, como por ejemplo la fricción superficial para el intercambio de momento angular Tierra-atmósfera.

Con relación al párrafo anterior cabe mencionar a Oort (1989), quien indica que *“No debería pasar inadvertido que la mayor parte de la variabilidad temporal del momento angular del planeta está ligada a la componente zonal del viento respecto a la tierra en rotación. El balance del momento angular de la tierra es un ejemplo maravilloso y simple de la forma en que los distintos elementos del clima (atmósfera, océanos, y tierra sólida) trabajan juntos y unificados a través de una ley de conservación física, a pesar de las enormes diferencias en sus masas y en sus escalas de espacio y tiempo. La pequeña y altamente turbulenta componente del sistema climático con una masa de solamente 10^{-6} de aquella de la Tierra, acelera y desacelera la gigantesca Tierra”* ¡parece que la cola del elefante rueda al elefante! A lo largo del trabajo se pudo observar, que los epicentros sísmicos tienden a localizarse muy próximos a la ubicación de las isolíneas de valor cero de diferentes variables atmosféricas tales como: alturas geopotenciales

en diferentes niveles isobáricos; componentes zonal y meridional del viento; “zona de ceros” de las anomalías del potencial de la velocidad. A esta singular característica se le denomina aquí con el nombre coloquial de “danza de los ceros”, como reconocimiento de que ello expresa alguna implicación importante, un patrón consistente de acoples entre las anomalías troposféricas y los disparos sísmicos.

De los 25 eventos sísmicos incluidos en el estudio, 22 ocurrieron en la “zona de ceros” del campo de las anomalías del potencial de la velocidad, y 2 en la “zona de cambio de orden de magnitud” del campo, lo que muestra la preferencia de la sismicidad por dispararse en las cercanías de estos dos tipos de zonas. Solo un caso mostró magnitud cercana a $+4.5 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$, ligeramente por encima de la “zona de ceros”. Por otra parte, 20 casos fueron eventos interplaca y cuatro intraplaca, lo que significa que los lugares más propensos a presentar sismicidad, son aquellos donde las “zonas de ceros” y las “zonas de cambio de orden de magnitud” cortan o corren semiparalelas a las fosas y fallas tectónicas.

El hecho de que la sismicidad se localice en las proximidades de las fosas y fallas tectónicas, es perfectamente conocido desde hace mucho tiempo y así lo demuestran los mapeos mundiales de dichos eventos. Pero la nueva hipótesis planteada en este trabajo, es que unos días antes y durante el disparo de la sismicidad, la litosfera se acopla con la troposfera. O sea, la existencia de las fosas y fallas tectónicas por sí solas no garantizan el disparo de la sismicidad, se requiere de la participación atmosférica en el proceso de disparo, lo que dirige la atención hacia los mecanismos de acople entre la circulación general de atmósfera y la tierra sólida.

En latitudes medias, los sismos se asociaron con ondas largas tipo Rossby desarrolladas en las corrientes en chorro en altura, con longitudes de onda entre 50° y 100° de longitud. Oort (1989)

señala que el momento angular atmosférico es transferido hacia latitudes medias por ondas largas, lo que conectaría la sismicidad con el momento angular atmosférico y la Duración del Día, vía la circulación general de la atmósfera.

Todo apunta a que el proceso de acople entre la tierra sólida y la atmósfera previamente, y durante el disparo de la sismicidad de cualquier magnitud, es un proceso geofísico que se establece como parte de la fricción entre la troposfera y la litosfera, y funciona como vehículo para incidir en el mantenimiento de la conservación del momento angular Tierra-atmósfera, y por ende en la Longitud del Día.

Los resultados de este estudio sugieren, que las anomalías troposféricas podrían utilizarse como precursores importantes en la detección anticipada de la sismicidad. En la elaboración de este trabajo se revisaron centenares de eventos sísmicos y sistemáticamente aparecieron anomalías atmosféricas como las descritas. Sin embargo, en las áreas tropicales se hizo difícil identificar con facilidad los tipos de anomalías encontradas en latitudes mayores. Ello podría deberse a los débiles gradientes de presión y del viento que caracterizan las regiones tropicales. De hecho, el terremoto de Sumatra del 26 de diciembre de 2004, se localizó en una zona de “cambio de orden de magnitud” en las anomalías del potencial de la velocidad en la troposfera alta, sin embargo los acoples troposféricos en la escala sinóptica dejaron algunas dudas como para mostrar el caso. En zonas tropicales con latitudes entre 10°N y 10°S , fue difícil identificar anomalías troposféricas que superaran espesores verticales mayores 1.5 km de altura (850 hPa).

Un punto que no puede dejar de mencionarse, es el cambio climático derivado del calentamiento global. De acuerdo al Quinto Informe de Síntesis del IPCC (2013), el calentamiento en el sistema climático es inequívoco y desde la década de 1950 muchos de los cambios observados no han tenido

precedentes en los últimos decenios a milenios. Además, desde esa fecha aproximadamente, se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos.

Ya que la circulación general de la atmósfera es receptora directa del calentamiento antropogénico, todo aquello que se acople a ella debería por tanto experimentar el cambio climático. Siendo la primera vez, hasta donde se pudo verificar, que se propone un acople directo y de dimensión planetaria (acople TL) de la sismicidad con la circulación general de la atmósfera, esta visión podría redirigir en algún grado las investigaciones sobre el cambio climático, cuando se comprendan mejor los procesos de acople TL. Si los procesos atmosféricos intercambian energía con la litosfera mientras experimentan a la vez cambios debido al calentamiento global, cualquier exceso o merma de energía de origen antropogénico recibido por la troposfera impactaría también la litosfera.

5. REFERENCIAS

- Alfonso, A. (2014). *Sismicidad en el área de Canarias y en la cuenca sedimentaria de Tarfaya*. Recuperado de: <http://www.lavozdelanzarote.com/opinion/antonio-afonso/sismicidad-area-canarias-y-cuenca-sedimentaria-tarfaya/20141127153705094569.html>.
- Anderson, J. D. & R. D. Rosen. (1983). The latitude-height structure of 40-50 day variations in atmospheric angular momentum. *J. Atmos. Sciences*. 40, 1584-1591.
- Byrd, D. (11 March, 2012). *Richard Gross: Japan earthquake shortened Earth's day 1.4 millionths of a second*. Earth Sky. Recuperado de: <http://earthsky.org/earth/richard-gross-japan-earthquake-shortened-earths-day-1-4-millionths-of-a-second>.
- Ding, J. H. & Suo Y. C. & Su Y. R. (2005). Phenomena of geomagnetic and ionospheric anomalies and their relation to earthquakes (in Chinese). *Chin J Space Sciences*, 25: 536–542.
- Driscoll S. (2010). *The Earth's Atmospheric Angular Momentum Budget and its Representation in Reanalysis*. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. University of Reading, School of Mathematical and Physical Sciences.
- Domex. (2011). *Velocity Potential-MJO*. Recuperado de: <http://www.domex2011.com/velocity-potential>.
- NOAA/ERSL Physical Sciences Division. (s.f.). *Daily and 6-hourly Mean Composites. Mean Composites NCEP/NCAR Reanalysis 1948-present*. Recuperado desde: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/day/>
- IPCC. (2013). The Physical Science Basis – Summary for Policymakers (AR5 WG1) Climate Change 2013.
- Internet Geography (2015). *Japanese Earthquake 2011*. Recuperado de: http://geography.learnontheinternet.co.uk/topics/japan_earthquake.htm
- Langley, R. B.; King, R. W.; Shapiro, I. I.; Rosen, R. D. & Salstein, D. A. (1981). Atmospheric angular momentum and the length of day: a common fluctuation with a period near 50 days. *Nature*, 294, 730-732.
- Leonard R. S. & Barnes R. A. (1965). Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake. *J. Geophys Res*, 70: 1250–1253.
- Li, Q.; Liu, M. & Yang, Y. (2002). The 01/26/2001 Bhuj, India, earthquake: Intraplate or Interplate? In *Plate Boundary Zones - AGU Geophysical Monograph*, edited by S. Stein and G. Freymuller, pp. 255-264, 2002.
- List of historical earthquakes (s.f.). En Wikipedia. Recuperado de: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_historical_earthquakes.

- Liu, Z.; Luo, W.; Ding X. & Chen, W. (2011). *The New Characteristics of Ionospheric Total Electron Content (TEC) Disturbances prior to Four Large Earthquakes*. "7th Annual seminar on Spatial Information Science and Technology (ASSIST 2011)", Hong-Kong.
- Molchanov, O.; Fedorov, E.; Schekotov, A.; Gordeev, E.; Chebrov, V.; Surkov, V.; Rozhnoi, A.; Andreevsky, S.; Ludin, D.; Yunga, S.; Lutikov, A.; Hayakawa, M. & Biagi, P. (2004). Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling as governing mechanism for preseismic short-term events in atmosphere and ionosphere. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 4: 757–767. SRef-ID: 1684-9981/nhess/2004-4-757.
- Namias, J. (1989). Summer earthquakes in southern California related to pressure patterns at sea level and aloft. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 941, no. B12, pp. 17671-17679, DOI: 10.1029/JB094iB12p17671.
- Nishida, K. & Takagi, R. (2016). Teleseismic S wave microseisms. *Science*, Vol. 353, Issue 6302, pp. 919-921, DOI: 10.1126/science.aaf7573.
- Omori, Y.; Yasuoka, Y.; Nagahama, H.; Kawada, Y.; Ishikawa, T.; Tokonami, S. & Shinogi M. (2007). Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena. *Nat Hazards Earth Syst Science* 7: 629–635.
- Oort, A. (1989). Angular Momentum cycle in the Atmosphere-Ocean-Solid Earth System. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 70 (10), 1231-1242.
- Ouzounov, D.; Pulinets, S.; Romanov, A.; Romanov, A.; Tsybulya, K.; Davidenko, D.; Kafatos, M. & Taylor, P. (2011). *Atmosphere-Ionosphere Response to the M9 Tohoku Earthquake Revealed by Joined Satellite and Ground Observations*. Preliminary results.
- Ouzounov, D. & Freund, F. (2004). Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Adv. Space Res.* 33, 268–273.
- Petrov, L. & Boy, P. (2004). Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*. Volume 109, Issue B3.
- Pulinets, S. & Boyarchuk, K. (2004). *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Springer, Berlin, Germany.
- Pulinets, S. & Ouzounov, D. (2011). Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model - An unified concept for earthquake precursor's validation. *Journal of Asian Earth Sciences*. Volume 41, Issues 4-5, June 2011, pages 371-382.
- Rosen, R. D. & Salstein, D. A. (1983). Variations in atmospheric angular momentum on global and regional scales and the length of day. *J. Geophys. Res.* 88, 5451-5470.
- RT. (6 de mayo, 2015). Naza: el terremoto en Nepal alteró la atmósfera de la tierra. *RT en español, noticias internacionales*. Recuperado de: <https://actualidad.rt.com/ciencias/174011-terremoto-nepal-alterar-atmosfera-tierra>.
- Sasorova, E. V.; Levin, B. W. & Rodkin, M. V. (2013). A common feature in latitudinal dependence of different geophysical processes occurring on the rotating earth. *Adv. Geosci.* 35, 15–21, doi:10.5194/adgeo-35-15-2013.
- Sidorenkov, N., S. (2004). *Influence of the atmospheric and oceanic circulation on the plate tectonics*. Hydromet Center of Russia 11-13 Bolshoi Predtechensky per., 123458 Moscow, Russia.
- UPSeis - an educational site for budding seismologists. (s.f.). *¿Where Do Earthquakes Happen?* Recuperado de: <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/where.html>.
- USGS, science for a changing world (s.f.) *Earthquakes. Latest earthquakes*. Recuperado de: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>.

- Volland, H. (1996). Atmosphere and Earth's rotation. *Surveys in Geophysics*. 17: 101. doi:10.1007/BF01904476.
- Watada, S.; Kunugi T.; Hirata, K.; Sugioka, H.; Nishida, K.; Sekiguchi, S.; Oikawa, J.; Tsuji, Y. & Kanamori, H. (2006). Atmospheric pressure change associated with the 2003 Tokachi-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*. VOL. 33, L24306, doi:10.1029/2006GL027967, 2006.
- Yao, Y. B.; Chen, P.; Wu, H. (2011). Analysis of ionospheric anomalies before the 2011 Mw 9.0 Japan earthquake. *Chin Sci Bull*. 57: 500-510, doi: 0.1007/s11434-011-4851-y.
- Zharov, V., E., (1996). Connection of the earth's rotation with the atmospheric angular momentum and the strongest earthquakes. *Astronomical & Astrophysical Transactions. Journal of the Eurasian Astronomical Society*. Volume 9, Issue 4, 1996, pages 317-327. DOI:10.1080/10556799608208230.

Acoples a nivel mundial entre las placas tectónicas y la circulación general de la atmósfera antes y durante el disparo de erupciones volcánicas

ELADIO ZÁRATE HERNÁNDEZ¹

Resumen

Este trabajo sigue la misma metodología aplicada en Zárate (2018 / Atmósfera-sismicidad), donde se muestran las interacciones y acoples entre la circulación general de la atmósfera y las placas tectónicas, antes y durante el disparo de eventos sísmicos. Se encontró que en la escala planetaria las erupciones volcánicas tienden a dispararse preferentemente en donde las “zonas de ceros” del campo de las anomalías del potencial de la velocidad en altura, intersectan o corren semiparalelas a las fosas y fallas tectónicas. En la escala sinóptica las erupciones volcánicas tienden a dispararse en la proximidad de las isolíneas de valor cero de las anomalías de las componentes zonal o meridional del viento. Se enfatiza que el trabajo se centra en el “disparo” de las erupciones volcánicas y no en los procesos geológicos que las generan, lo que pertenece a las escalas propias de la tierra sólida. Se encontró también, que los mecanismos de acople entre la troposfera y la litosfera para esos disparos resultan altamente similares, tanto para erupciones con alto Índice de Explosividad Volcánica (IEV), como aquellas con bajo Índice. La Circulación General de la Atmósfera en su accionar con el Momento Angular de la Tierra y la Duración del Día, estarían íntimamente ligados a las erupciones volcánicas.

PALABRAS CLAVE: ERUPCIÓN VOLCÁNICA, CIRCULACIÓN GENERAL, ANOMALÍAS.

Abstract

This work follows the same methodology applied in Zárate (2018 / atmosphere-seismicity) where the interactions and couplings between the general circulation of the atmosphere and the tectonic plates are showed, before and during the triggering of seismic events. It is found that in the planetary scale the volcanic eruptions tend to be triggered preferentially where the “zone of ceros” of the velocity potential anomalies in the upper troposphere, intercepts the tectonic trenches and faults or run semi-parallel to them. In the synoptic scale the volcanic eruptions tend to be triggered on the zero value isopleths of the zonal and meridional wind components. It is emphasized that the work is centered in the “triggering” of the volcanic eruptions and not in the geologic processes that form them, aspect that belongs to the geological scales of the solid earth. It is found too that the coupling mechanism between the troposphere and the lithosphere to trigger the eruptions is highly similar, both for high and low Volcanic Explosive Index (VEI). The General Circulation of the Atmosphere in its interaction with the Earth Angular Momentum and Length of the Day would be closely linked to the volcanic eruptions.

KEYWORDS: VOLCANIC ERUPTION, GENERAL CIRCULATION, ANOMALIES.

1. INTRODUCCIÓN

Inicialmente este trabajo formaba parte de uno más extenso, que incluía interacciones de eventos sísmicos y erupciones volcánicas con anomalías

atmosféricas. Sin embargo, por razones prácticas se separó en dos, uno para la sismicidad y el presente sobre las erupciones volcánicas, en donde se utiliza el mismo enfoque conceptual.

¹ Investigador *ad-honorem*, Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. Correo electrónico: eladio.zarate@ucr.ac.cr

Las interacciones entre las erupciones volcánicas y la atmósfera son ampliamente conocidas y han sido objeto de estudio mundialmente. Cuando se presentan erupciones volcánicas explosivas e intensas se inyectan grandes cantidades de gases, aerosoles y cenizas hasta la estratosfera (USGS, s.f). Las cenizas por su peso caen en cuestión de días o semanas, mientras que los gases volcánicos como el dióxido de sulfuro pueden causar enfriamiento global al convertirse en ácido sulfúrico, el cual se condensa rápidamente en la estratosfera y forma finos aerosoles de sulfato. Estos aerosoles incrementan la reflexión de la radiación de vuelta hacia el espacio exterior, enfriando la parte baja de la troposfera. Por otro lado, es conocido que el dióxido de carbono genera calentamiento atmosférico, sin embargo, el dióxido de carbono liberado en erupciones volcánicas contemporáneas no ha causado nunca calentamientos globales detectables. Todos los estudios concluyen que el dióxido de carbono liberado por las erupciones volcánicas contemporáneas, no ha causado calentamiento global detectable. De hecho, las emisiones de los volcanes aéreos y submarinos liberan menos de un 1% del dióxido de carbono liberado actualmente por las actividades humanas (USGS, s.f).

En un campo menos estudiado hasta ahora, Sottili et al. (2015) encontraron que erupciones volcánicas con Índice de Explosividad Volcánica $IEV \geq 3$ (IEV se define en la metodología), actuaban en forma opuesta según se incrementaba o se reducía la longitud del día. Erupciones en arcos volcánicos a lo largo de las zonas de subducción o de bordes convergentes orientados en dirección E o NE, ocurrían con incrementos en la longitud del día, mientras que con reducciones en la longitud del día las erupciones eran más frecuentes a lo largo de zonas de subducción orientadas en dirección O ó SO, caracterizadas por una extensión de la placa superior y una expansión en la parte posterior del arco. Las orientaciones antes mencionadas, se consideran en el mismo sentido (E/NE) o en oposición (O/SO) al flujo del

manto, inferido de la rotación neta de la litosfera relativa al manto subyacente.

En otro contexto en el campo de la tierra sólida, Zharov (1996) encontró que los cambios rápidos en las funciones del momento angular atmosférico efectivo (AAM), mostraban una fuerte correlación con los instantes en que suceden los terremotos y las variaciones rápidas de la Longitud del Día.

Los hallazgos de Sottili y Zharov resultan de suma importancia, dado que los acoples troposfera-erupciones volcánicas mostrados en este estudio, parecen llevarse a cabo con la plena participación de la circulación general de la atmósfera, principal factor entre los varios elementos que intervienen en el balance del momento angular tierra sólida-atmósfera. Driscoll (2010) indica, que el momento angular total de la atmósfera, océanos y tierra sólida se mantiene constante en el largo plazo, excepto por un lento decrecimiento secular debido a la fuerza gravitacional ejercida por los planetas. Sin embargo, para plazos cortos existe transferencia entre los tres componentes mencionados, de tal forma que si el momento angular de la atmósfera se incrementa, uno de los otros elementos tiene que haber sido transferido hacia la atmósfera. Análogamente si la atmósfera pierde momento angular, este tiene que haber sido transferido hacia uno de los otros elementos.

Zárate (2018) encontró acoples entre la troposfera y la litosfera en todo el planeta y épocas del año para el disparo de la sismicidad. Estos acoples se dan unos días antes y durante el disparo de los sismos y son válidos para grandes terremotos, como por ejemplo el de Valdivia, Chile, el 22 de mayo de 1960, con una magnitud de 9.5 Mw, hasta sismicidad medida pero no sentida, como el caso de un enjambre sísmico en las Islas Canarias, ocurrido el 12 de enero de 2015. En los acoples entran en juego dos escalas atmosféricas, la escala planetaria del potencial de la velocidad y la escala sinóptica. Un alto porcentaje de los sismos se ubicaron en donde las “las zonas de ceros”

de las anomalías del potencial de la velocidad cortaban o corrían semiparalelas a las fosas y fallas tectónicas, simultáneamente, las líneas de valor cero de las anomalías de las componentes del viento en la escala sinóptica pasaban muy próximas a las áreas epicentrales.

Este trabajo se basa en una metodología observacional de acoples entre anomalías en la troposfera y erupciones volcánicas, lo cual ocurre en todo el planeta, en cualquier época del año y a cualquier hora del día. Estas anomalías troposféricas resultan bastante similares en configuración, tanto para erupciones volcánicas con alto como con bajo índice IEV. En la escala planetaria se nota que las erupciones volcánicas tienden a ubicarse mayoritariamente, en las proximidades de las isolíneas de valor cero del campo planetario de las anomalías del potencial de la velocidad, en el nivel Sigma .1682, cuando este campo exhibe números de onda zonal 1 o 2, o sea, campos bien organizados. En la escala sinóptica los sitios de las erupciones volcánicas, tienden a coincidir con la posición de las isolíneas de valor cero de las anomalías de las componentes zonal o meridional del viento, en los diferentes niveles troposféricos. Esto resulta altamente similar, si no idéntico, a lo presentado por Zárate (2018) para los acoples entre la troposfera y las áreas epicentrales de los sismos.

Con base en los hallazgos de Zárate (2018), la principal hipótesis que se propone para los acoples de las erupciones volcánicas con las anomalías troposféricas, es que las cargas de la presión atmosférica en vastísimas zonas geográficas, y las fuerzas anómalas ejercidas por profundas capas atmosféricas de viento durante varios días sobre una placa tectónica individual o sobre varias placas limítrofes entre sí, se acoplan antes y durante una erupción volcánica en el disparo de la energía volcánica acumulada por los procesos geológicos en plazos de unos pocos años, décadas o centurias.

2. METODOLOGÍA

Se analizaron seis erupciones volcánicas en diversas partes del planeta, en el periodo 1948-2015. Las erupciones van desde muy intensas, por ejemplo, el volcán Pinatubo en 1991 con un Índice de Explosividad Volcánica de 6, hasta erupciones con un IEV de 1.

Dado que las características de los acoples entre las erupciones volcánicas y las anomalías troposféricas son sorprendentemente similares independientemente de sus magnitudes, se realizó un análisis detallado para la erupción del volcán Pinatubo del 15 de junio de 1991 y las restantes se tratan con menor detalle.

Algunas imágenes e informaciones fueron tomadas de páginas de Internet y documentadas en la bibliografía del artículo. Los datos sobre las erupciones volcánicas fueron tomados de Siebert et al. (2010). Los mapas meteorológicos se confeccionaron utilizando la siguiente fuente: "Image provided by the NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>" (NOAA/ESRL, s.f.) Las anomalías presentadas en los mapas meteorológicos se calcularon con respecto al periodo climático 1981-2010.

En el trabajo se utilizó el sistema de casos de estudio, enfatizando en una metodología observacional al comparar las anomalías troposféricas con la posición geográfica de las erupciones volcánicas, así como la acción de dichas anomalías sobre las placas tectónicas que intervienen, para obtener patrones de comportamiento entre los casos analizados. Se esbozan hipótesis dirigidas a entender los aparentes acoples entre la troposfera y la litosfera y se adoptó el mecanismo de acople Troposfera-Litosfera (TL) propuesto por Zárate (2018).

En las figuras se utilizaron las siguientes simbologías: un triángulo rojo para indicar erupciones volcánicas; flechas para indicar las

direcciones del vector viento o sus anomalías zonal y meridional; al pie de las figuras se utilizan las siguientes abreviaturas: izq: izquierda, der: derecha, arr: arriba, ab: abajo.

Dado que el artículo combina elementos de meteorología y vulcanología, a continuación se ofrece información sobre algunos términos utilizados en el trabajo.

- **El Índice de Explosividad Volcánica (IEV):** mide el incremento de la explosividad volcánica entre 0 y 8, y cada intervalo representa un incremento cercano a un factor de 10. El índice combina el volumen total de productos explosivos, altura de la nube de erupción, términos descriptivos y otras medidas (Siebert et al., 2010).
- **Potencial de la velocidad:** es un campo escalar que describe la parte divergente irrotacional del viento en un flujo horizontal. El gradiente del potencial de la velocidad describe la componente divergente del viento, mientras que la divergencia del viento está dada por el Laplaciano (curvatura) del potencial de la velocidad. Por lo general, los centros de regiones con potencial positivo muestran vientos convergentes en el nivel de 200 hPa (laplaciano negativo) y movimiento vertical descendente. Regiones con potencial negativo muestran divergencia y movimientos ascendentes del aire. Así en regiones con convección profunda, el potencial de la velocidad es negativo, consistente con la divergencia en altura que producen las corrientes ascendentes. La NOAA produce mapas diarios para la detección del potencial de la velocidad los cuales muestran también la salida de radiación infrarroja, lo que facilita la comprensión entre el potencial de la velocidad y los campos nubosos (DOMEX, 2011). Los mapas de las anomalías del potencial de la velocidad utilizados en el artículo, responden al nivel sigma .1682, lo que coincide aproximadamente con el nivel

isobárico de 200 Hpa o 12 km de altura. Sigma es una coordenada vertical, definida como una razón de la presión en un punto de la atmósfera y la presión superficial bajo dicho punto.

- **“Zonas de ceros” y “zonas de cambio de orden de magnitud” en el campo de las anomalías del potencial de la velocidad:** las “zonas de ceros” se definen arbitrariamente en el estudio como el rango que va de -3.5×10^6 a 3.5×10^6 (m^2/s), considerando que los mínimos del campo por lo general exhiben valores cercanos a -1.2×10^7 (m^2/s), y los máximos alcanzan valores cercanos a 1.2×10^7 (m^2/s). Las “zonas de cambio de orden de magnitud” se definen arbitrariamente entre los rangos de $+8 \times 10^{-6}$ a $+1.2 \times 10^{-7}$ para los máximos del campo, y de -8×10^{-6} a -1.2×10^{-7} para los mínimos.
- **Número de onda zonal para las anomalías del potencial de la velocidad:** responde al número adimensional de longitudes de onda que caben en un círculo alrededor del planeta sobre una latitud determinada. En este artículo se utiliza con relación a la latitud ecuatorial.
- **Isolíneas cero:** se refieren a las isolíneas de separación entre los valores positivos y negativos de las anomalías de la presión, y de las anomalías de las componentes zonal y meridional del viento.
- **Acople vertical:** significa que una condición se extiende por varios kilómetros de altura en forma aproximadamente vertical. Así, cuando se menciona que la isolínea de valor cero de la anomalía zonal del viento se acopla con el sitio de una erupción, debe entenderse que existe una verticalidad aceptable entre un nivel inferior de la troposfera con otro superior para dicha isolínea.
- **Escala sinóptica:** es la escala de los sistemas de alta y baja presión de la atmósfera inferior, cuyas dimensiones típicas van de 1.000 a 2.500 km,

aproximadamente. Un huracán, por ejemplo es un disturbio típico de escala sinóptica.

- **Escala planetaria:** configuraciones meteorológicas que pueden tener periodos de vida de semanas o más y distancias de 4.000 a 40.000 km, como por ejemplo el sistema de los vientos alisios.
- **Onda larga tipo Rossby:** ondas en el viento de la troposfera superior en latitudes medias, que dibujan gigantescos meandros y están asociadas con sistemas de presión y corrientes en chorro en la troposfera superior. Por su tamaño, se las conoce también como ondas planetarias.
- **Oscilaciones Madden-Julian** (MJO del inglés): es el mayor elemento de variabilidad intraestacional en la atmósfera tropical. Es una configuración asociada a la convección

y a los campos de convergencia/divergencia en superficie y altura, que circunda la tierra por su zona ecuatorial en un plazo de 30 a 60 días y tiene relación con el comportamiento atmosférico de todo el planeta.

3. DESARROLLO

3.1. Caso de estudio: Erupción del volcán Pinatubo, isla Luzón, Filipinas - 15 de junio de 1991

Para mostrar los acoples entre los campos troposféricos y las erupciones volcánicas, se utilizó el caso del volcán Pinatubo ($15^{\circ}08'N$, $120^{\circ}21'E$), localizado en la isla Luzón, República de Filipinas, entre las placas tectónicas de Filipinas y la Euroasiática, tal como lo muestra el triángulo rojo en la figura 1. El 15 de junio de 1991 el volcán produjo la segunda erupción volcánica más grande del siglo XX, alcanzando nivel 6 en el Índice



Figura 1. Mapa de la Republica de Filipinas. El triángulo rojo ubica el volcán Pinatubo entre las placas tectónicas de Filipinas y la Euroasiática (Free map viewer, s.f.). Las líneas blancas a trazos son límites de las placas tectónicas agregadas a la figura original.

de Explosividad Volcánica. No se utilizó la mayor erupción del siglo XX, por ser del año 1912 y no se dispone de información meteorológica.

Después de más de 400 años de inactividad, el Pinatubo despertó el 3 de agosto de 1990, con fuertes retumbos, desprendimiento de materiales cerca de su cumbre y rupturas con emanación de gases. Luego se siguió presentando sismicidad, emanación de gases, retumbos y algunas erupciones en fechas sucesivas, hasta que el 15 de junio de 1991 a las 1:42 p.m. hora local (05:42 UTC) se produjo la gran erupción, en donde los materiales arrojados a la atmósfera alcanzaron hasta 35 km de altura. Un tópico de relevancia que se analiza más adelante, es que la enorme erupción volcánica tuvo lugar mientras el tifón Yunya se movía a través de la isla Luzón.

Para la gran erupción del día 15 de junio de 1991, el campo planetario de las anomalías del potencial de la velocidad en el nivel Sigma .1682, mostraba número de onda zonal 1 y el valor del campo sobre el volcán Pinatubo era de $-2.6 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ (zona de ceros), en el periodo 13-15 de junio, como se puede observar en la figura 4 der. Las anomalías atmosféricas en la escala sinóptica se iniciaron

alrededor de 102 horas antes de la erupción y se extendieron desde el nivel de superficie hasta los 16 km de altura (100 hPa). Las anomalías fueron producto de una amplísima zona de baja presión, que generó una circulación antihoraria que se extendió desde la parte occidental del Mar del Sur de la China, pasando sobre Filipinas y continuando hasta la línea de cambio de fecha en el océano Pacífico, como se muestra en la figura 2 izq., en el nivel de 500 hPa, para el periodo del día 11 a las 00UTC al 15 de junio a las 06UTC. La amplísima zona de baja presión estuvo ligada a una oscilación Madden-Julian (MJO) que se describe más adelante.

Dentro de esa amplísima zona de baja presión se pueden identificar tres subcentros de circulación antihoraria (A). La figura 2 der., muestra las anomalías de la componente zonal del viento en el mismo nivel y periodo antes citado. Nótese que en el periodo de 102 horas previas a la erupción, la isolínea cero de dichas anomalías atraviesa muy próxima a la ubicación del volcán. Esto hizo que al norte del Pinatubo las placas tectónicas de Filipinas y la Eurasiática (figura 1), recibieran un empuje dirigido hacia el oeste, ejercido por una capa atmosférica de 16 km de espesor, mientras

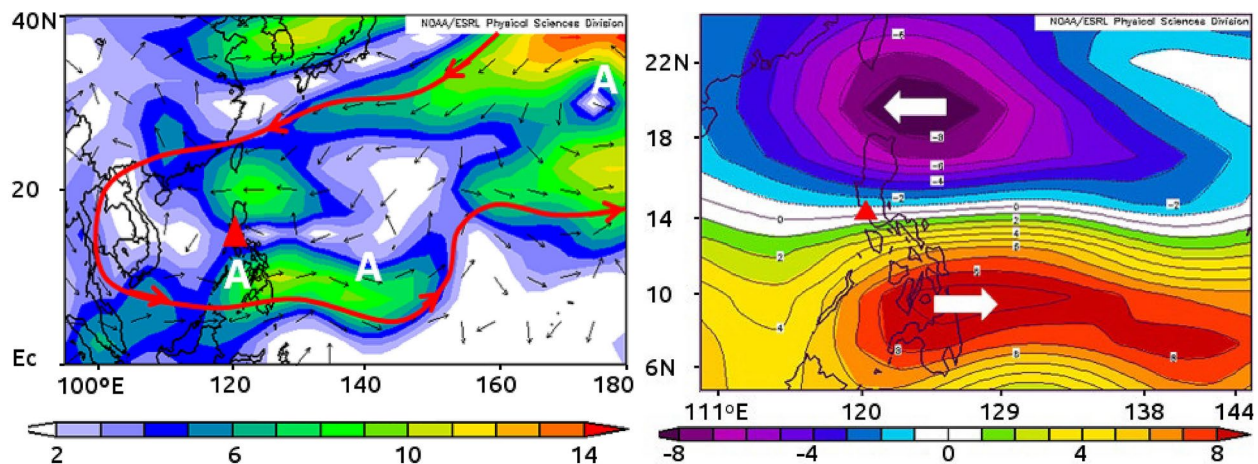


Figura 2. Nivel de 500 hPa para el periodo 11/00 UTC - 15/06 UTC de junio de 1991 (102 horas). Izq: anomalías del viento (m/s) mostrando una amplísima zona con circulación antihoraria compuesta por tres subcentros (A). Der: el volcán Pinatubo quedó ubicado prácticamente sobre la isolínea de valor cero de las anomalías de la componente zonal del viento (m/s) en ese periodo de 102 horas. Las flechas indican las direcciones de dichas anomalías.

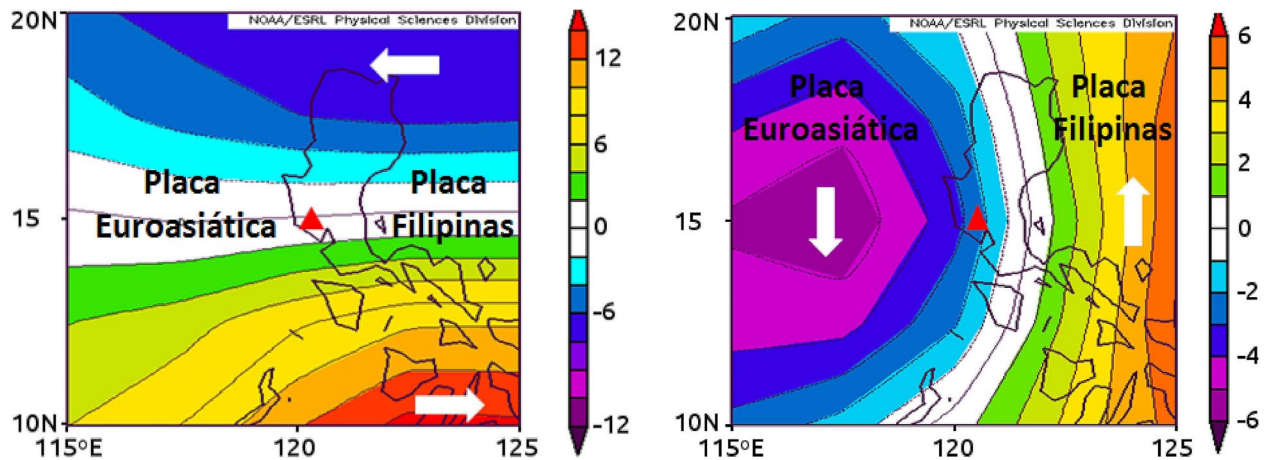


Figura 3. Mapas compuestos para las anomalías del viento (m/s), en el nivel de 500 hPa, en el periodo del 14/18 UTC -15/06 UTC de junio de 1991. Izq: zonal y der: meridional.

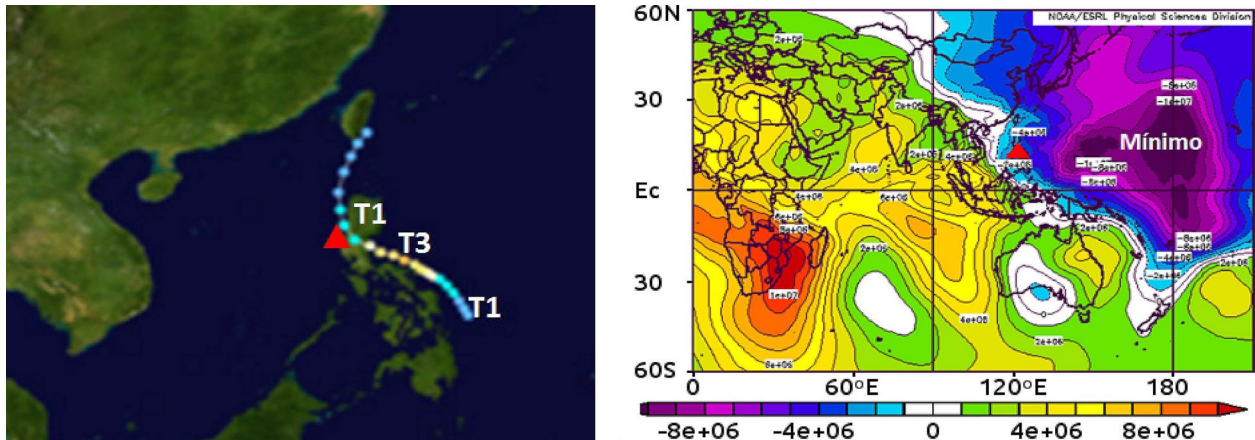


Figura 4. Izq: Trayectoria del Tifón Yunya pasando muy próximo al volcán Pinatubo (T1: categoría 1, T3: categoría 3 (Wikipedia, (2018a)). Der: ubicación del volcán Pinatubo, triángulo rojo, en la “zona de ceros” del mapa de las anomalías del potencial de la velocidad (m^2/s) en el nivel Sigma .1682 para el periodo del 13-15 de junio de 1991.

que al lado sur del volcán ambas placas recibieron el empuje en el sentido opuesto.

En horas cercanas a la erupción, gracias a la presencia del tifón Yunya próximo al volcán, ambas componentes alcanzaron un giro casi circular con respecto a los días anteriores, tal como lo sugieren las anomalías de las componentes zonal y meridional de la figura 3, en el periodo de 12 horas previo a la erupción, del día 14 a las 18 UTC al 15 a las 06 UTC - nivel de 500 hPa.

La presencia del tifón Yunya resultó de sumo interés en el análisis de esta erupción. Yunya inició

como una débil perturbación tropical el día 11 de junio (figura 4 izq.), al este de la isla de Samar, unos 550 km al sureste del volcán Pinatubo. Para el día 13 había alcanzado la categoría de tifón categoría 1 (T1), manteniendo movimiento oeste-noroeste cerca de las Filipinas. El día 14 alcanzó su máxima intensidad de tifón categoría 3 (T3), con vientos de 195 km/h, decayó horas después y luego con la categoría de T1 cruzó hacia el Mar de la China, atravesando sobre la isla de Luzón a unos 100 km al noreste del Volcán Pinatubo. Esta fue la razón para que en las horas cercanas a la erupción, la circulación anómala antihoraria se tornase casi circular sobre el volcán.

¿Fue una coincidencia que la segunda erupción volcánica más grande del siglo XX aconteciera cuando el ojo del tifón Yunya pasaba a un centenar de kilómetros del volcán Pinatubo?

Para contestar esta pregunta se presenta en la figura 4 der., el campo de las anomalías del potencial de la velocidad en el nivel Sigma .1682, para el periodo del 13 al 15 de junio de 1991. Formando parte de este campo se identifica una oscilación Madden-Julian (MJO) que ocupaba la fase 7, Pacífico Occidental, de acuerdo al Diagrama de Fases según Wheeler–Hendon (2004) (Australian Government, 2018). El volcán Pinatubo, triángulo rojo, quedó ubicado en la “zona de ceros” de dicho campo. Lo que se señala como “Mínimo” en dicha figura, es una zona convectiva asociada a la oscilación MJO. En una MJO la fase convectiva significa convergencia del viento en la troposfera baja y divergencia en la troposfera alta. Por ello desde el día 11 de junio se había establecido en la troposfera baja una amplísima zona anómala de baja presión, con circulación antihoraria que incluía el área del volcán Pinatubo, como se indicó anteriormente. Pero además, las zonas marítimas tropicales que se ubican bajo las fases convectivas de las oscilaciones MJO, tienden a favorecer la formación de tifones y huracanes (Mo, 2000; Krishnamohan, et al., 2012; Zhang 2013 & Klotzbach, 2014), y en este caso se formó el tifón Yunya. El tifón acopló las anomalías de su propia circulación antihoraria, con la amplia circulación antihoraria preexistente debida a la MJO, e hizo que la presión atmosférica cayera sensiblemente sobre las placas tectónicas de las Filipinas y la Euroasiática en las cercanías del volcán, y que estas se vieran sometidas también a esfuerzos del viento con rotación antihoraria casi circular. De ahí que la simultaneidad en el paso del tifón Yunya con el inicio de la gigantesca erupción volcánica, lejos de ser una mera coincidencia, más bien habría sido el gran acople final troposfera-litósfera en el disparo del evento.

Resulta interesante agregar algo más sobre la posible participación de las oscilaciones MJO, en los disparos de las erupciones volcánicas y sus relaciones con La Longitud del Día y el momento angular tierra-atmósfera. Por ejemplo, el potencial de la velocidad que en este artículo muestra gran conexión con las erupciones volcánicas, mantiene también enorme relación con las oscilaciones Madden-Julian. El Índice Multivariado para la detección de las oscilaciones MJO, se basa en un par de funciones ortogonales empíricas de los campos combinados de los vientos zonales en 850 y 200 hPa en la zona ecuatorial, y datos de radiación de onda larga observada con satélite (Wheeler & Hendon, 2004).

Por otra parte, la radiación de onda larga obtenida con observaciones satelitales a nivel global en la troposfera superior, es precisamente la que se utiliza para indicar las áreas convectivas y las áreas de subsidencia en el mapeo diario del potencial de la velocidad (DOMEX, 2011), lo que deja ver la íntima relación que existe entre el potencial de la velocidad y las oscilaciones MJO. Es por eso que utilizando otro enfoque Ventrice et al. (2013) desarrollaron un índice “PV” para el seguimiento del potencial de la velocidad, que enfatiza preferiblemente los aspectos de escala planetaria de la circulación divergente del viento, distribuyendo la componente convectiva de la señal MJO a través de todo el globo. Debe resaltarse que las oscilaciones MJO constituyen un pilar fundamental en el mecanismo de la circulación general de la atmósfera, ya que sus influencias son sentidas en todo el planeta a través de teleconexiones, de gran escala en las configuraciones de la circulación del viento y la presión atmosférica, que resultan recurrentes y persistentes y que cubren vastas zonas geográficas. El otro gran pilar de la circulación general de la atmósfera son las ondas largas tipo Rossby, que se mencionan más adelante en relación con otras erupciones volcánicas.

Sottili et al. (2015) encontraron que erupciones volcánicas con Índice de Explosividad Volcánica ($IEV \geq 3$), actuaban en forma opuesta según se incrementaba o se reducía la Longitud del Día. Erupciones en arcos volcánicos a lo largo de las zonas de subducción o de bordes convergentes orientados en dirección E o NE (según al flujo del manto, inferido de la rotación neta de la litosfera relativa al manto subyacente), ocurrían con incrementos en la Longitud del Día, mientras que las reducciones en esa variable eran más frecuentes a lo largo de zonas de subducción orientadas en dirección O ó SO, caracterizadas por una extensión de la placa superior y una expansión en la parte posterior del arco.

Lo anterior orienta el pensamiento en el sentido de que la tierra sólida interactúa con la troposfera a través de las erupciones volcánicas, con incidencia en variaciones en el comportamiento del momento angular del sistema Tierra-atmósfera y por tanto en variaciones en la Longitud del Día. Oort (1989) hace ver que la mayor parte de la variabilidad temporal del momento angular del planeta, está ligada a la componente zonal del viento respecto a la tierra en rotación, y la pequeña y altamente turbulenta componente del sistema climático con una masa de solamente 10^{-6} de aquella de la Tierra, acelera y desacelera la gigantesca Tierra “¡parece que la cola del elefante rueda al

elefante!” dice Oort... y en este estudio se puede agregar: “y lo hace estremecerse (sismicidad) y estornudar también (erupciones)”.

Considerando que los acoples atmósfera - tierra sólida encontrados en el caso del volcán Pinatubo podrían verse como una mera casualidad, se analizan cinco casos más con diferentes magnitudes, en diferentes épocas del año y en diferentes partes del planeta, con el deseo de mostrar que es difícil que dichos acoples sean obra del azar. El análisis se hace con menor detalle, apelando a lo ya mostrado en el caso del Pinatubo.

3.2. Volcán Eyjafjallajökull

Las cenizas lanzadas por la erupción del volcán Eyjafjallajökull en Islandia, a partir del 14 de abril de 2010, se extendieron hasta Europa por varios días y la erupción alcanzó un Índice de Explosividad Volcánica de 4. Este volcán se ubica en la parte sur de Islandia, entre las placas tectónicas de Norteamérica y la Euroasiática, como lo muestra la figura 5 izq.

En el mapa compuesto de las anomalías del potencial de la velocidad en el nivel Sigma .1682 para el periodo 11-14 de abril, la erupción quedó localizada en la “zona de ceros” de un campo que tenía número de onda zonal 2 (no se muestra).

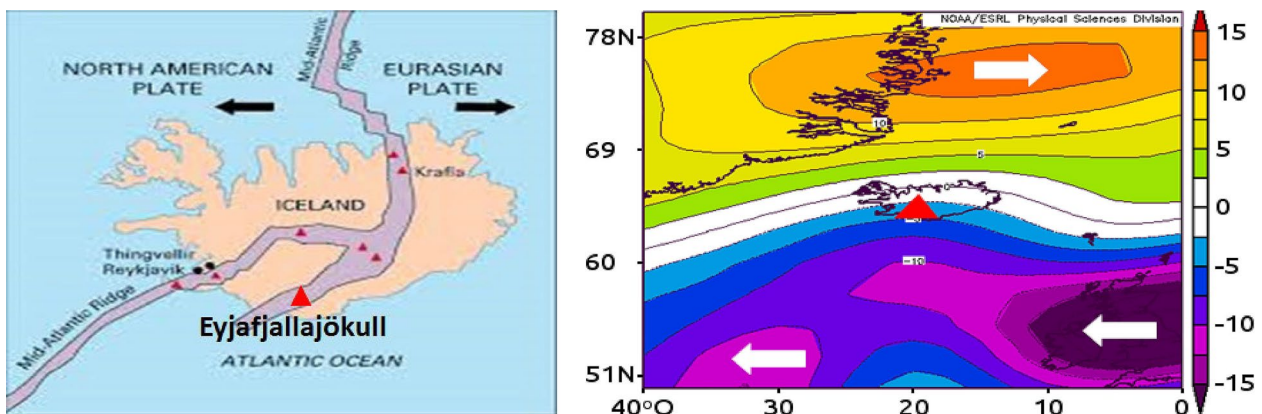


Figura 5. Izq: Localización del volcán Eyjafjallajökull al sur de Islandia, entre las placas de Norteamérica y la Euroasiática (Wikipedia, s.f.b). Der: Anomalías de la componente zonal del viento (m/s) en la capa atmosférica 850-200 hPa en el periodo 11-13 de abril de 2010 (la erupción inició a la 01:30 UTC del día 14).

En la escala sinóptica, el espesor vertical de las anomalías troposféricas del viento alcanzaron 18,5 km y actuaron desde 73 horas antes de la erupción. La anomalía de la componente zonal del viento en la capa atmosférica 850-200 hPa, se acopló con el sitio del volcán como se observa en la figura 5 der., para el periodo comprendido entre el 11 y el 13 de abril (la erupción aconteció a la 01:30 UTC, del día 14). Al sur del volcán dicha anomalía actuó en sentido de este a oeste, sobre las placas Euroasiática y de Norteamérica, al lado norte actuó en sentido contrario sobre las mismas placas, acoplando la isolínea cero con el sitio de la erupción. La causa del desarrollo de la circulación anómala con sentido horario, fue la formación de un amplio dorsal (eje de alta presión), en una onda larga tipo Rossby. Zárate (2018) encontró que la mayoría de los sismos analizados estuvieron asociados con ondas largas de ese tipo.

3.3. Isla Decepción, Antártica

La erupción volcánica acontecida en la isla Decepción en la Antártica, el 23 de julio de 1987, se presenta como un ejemplo austral de acoples troposfera-tierra sólida, aunque no se dispone

del valor del Índice de Explosividad Volcánica. La erupción se presentó en una “zona de ceros” de las anomalías del potencial de la velocidad, con número de onda zonal 1, anomalías que se proyectaron hasta la costa norte de la Antártica, a partir de una MJO localizada en la zona tropical en la fase 1, Hemisferio Occidental-África (Australian Government, 2018). En el campo sinóptico las anomalías mostraron una circulación anómala del viento, actuando en sentido horario desde unas 120 horas previas a la erupción, con un espesor troposférico de 21.5 km. Esta circulación anómala fue el producto de una intensificación y desplazamiento hacia el sur de la corriente en chorro en altura, así como un aceleramiento de los Estes polares sobre la Antártica. Las anomalías de la componente zonal del viento fue la que mejor se acopló con el sitio de la erupción, en el periodo 18-23 de julio, tal como se muestra en la capa atmosférica 850-200 hPa en la figura 6 izq.

Al norte de la isla Decepción las anomalías actuaron de oeste a este sobre la placa Antártica, la de Suramérica y la microplaca de Escocia (figura 6, der.), mientras que al lado sur actuó en sentido contrario sobre la placa Antártica, dejando el sitio de la erupción sobre la isolínea cero.

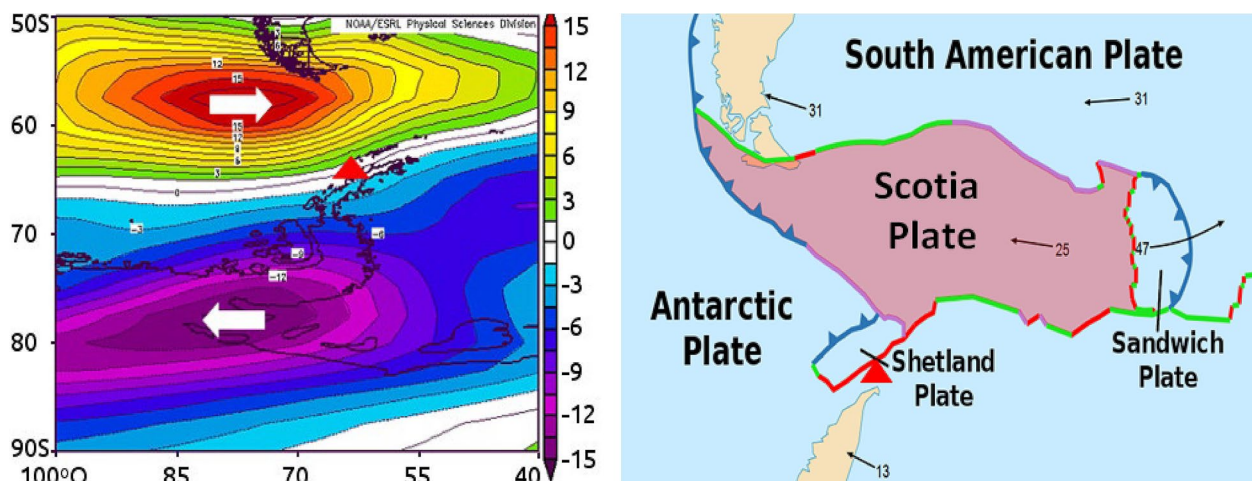


Figura 6. Izq: anomalías de la componente zonal del viento (m/s) en la capa atmosférica 850-200 hPa en el periodo 18-23 de julio de 1987. Der: El volcán, triángulo rojo, se ubica en la Isla Decepción entre las placa tectónica de Antártica y las microplacas de Escocia y Shetland. Las flechas negras indican el desplazamiento relativo de las placas tectónicas (Wikipedia, 2015).

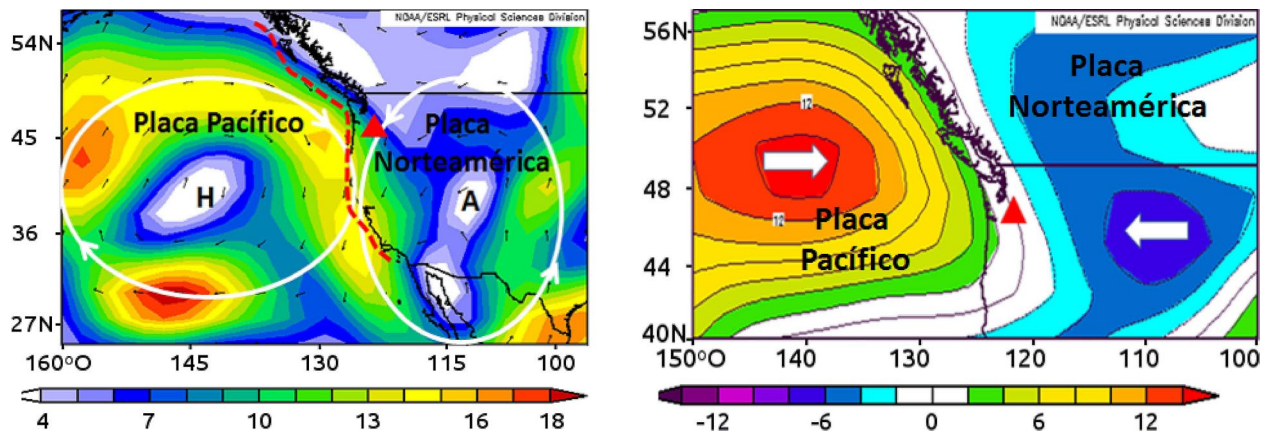


Figura 7. Nivel de 500 hPa en el periodo 26-27 de marzo de 1980. Izq: anomalías del viento (m/s) con circulación anómala horaria (H) sobre la placa del Pacífico y antihoraria (A) sobre la placa de Norteamérica. La línea roja a trazos sugiere la fosa tectónica divisoria entre las placas y el triángulo rojo señala la ubicación del Mount St. Helens. Der: anomalías de la componente zonal del viento (m/s) con efecto de convergencia sobre el límite entre placas.

3.4. Volcán Mount St. Helens – Estado de Washington – Estados Unidos

La erupción del volcán Mount St. Helens alcanzó un Índice de Explosividad Volcánica de 5, el día 27 de marzo de 1980 y las cenizas alcanzaron 24 km de altura en la atmósfera.

En el periodo 26-27 de mayo el campo de las anomalías del potencial de la velocidad mostraba número de onda zonal 1 y el valor del campo sobre el volcán era de $-8.5e+06$ (m^2/s), lo cual ubica la erupción en la “zona de cambio de orden de magnitud” de dichas anomalías. Este campo irradiaba desde una MJO localizada en el sector 7 – Pacífico Occidental (Australian Government, 2018).

En el campo sinóptico se identificó una onda larga formada en la corriente en chorro de altura, la cual generó dos circulaciones en sentidos opuestos en las anomalías del viento, con un espesor de 9 km de altura (300 hPa). Las circulaciones anómalas actuaron por alrededor de 50 horas, durante el periodo 26-27 de marzo como se muestra en la figura 7 izq., para el nivel de 500 hPa. No se utiliza la capa 850-200 hPa como en casos anteriores porque la anomalía alcanza hasta los 300 hPa, únicamente. Sobre la placa del Pacífico actuó

una circulación anómala en sentido horario (H) y sobre la placa de Norteamérica actuó otra en sentido antihorario (A). El límite entre las placas se encuentra marcado con la línea roja discontinua, casi paralela con la costa oeste de Estados Unidos y Canadá. Las formas de las circulaciones hicieron que las anomalías de la componente zonal del viento convergieran sobre el área del volcán, ejerciendo esfuerzos en sentidos contrarios sobre las placas del Pacífico y de Norteamérica, tal como se observa en la figura 7 der., para el mismo nivel y periodo antes mencionado.

Es importante destacar, que en este como en todos los casos de acoples troposféricos con erupciones volcánicas aquí presentados, los desbalances de presión entre grandes zonas geográficas jugarían un importante papel. Por ejemplo, la circulación horaria (H) en la figura 7 izq., se corresponde con una zona de alta presión sobre la placa del Pacífico, mientras que la circulación antihoraria (A) se corresponde con una baja presión sobre la placa de Norteamérica. Esto induce a pensar que los macro desbalances de presión atmosférica entre las placas, juegan también un importante papel en el disparo de la erupción volcánica. Además en este caso, las áreas de alta y baja presión atmosférica están separadas por las montañas Rocallosas, lo

cual podría haber ejercido un torque de montaña dirigido de oeste a este, o sea una fuerza de la alta hacia la baja presión, aspecto que también sería de tomar en cuenta en el disparo de la erupción volcánica.

3.5. Volcán Cerro Azul, Islas Galápagos

La erupción del volcán Cerro Azul en las Islas Galápagos (0.92 S, 91.408 O) mostró un Índice de Explosividad Volcánica de 1, el día 29 de mayo del 2008. Las anomalías del campo planetario del potencial de la velocidad en el nivel sigma .1682, en el periodo 28-29 de mayo, mostraron número de onda zonal 2 y sobre el sitio del volcán un valor de $-4.3e+06 \text{ m}^2/\text{s}$ (no se muestran), valor ligeramente salido con respecto a la “zona de ceros” del campo.

En el campo sinóptico se habrían combinado dos aspectos para el acople de las anomalías troposféricas con la erupción volcánica. Primero, desde el día 23 de mayo un campo anómalo de baja presión en la troposfera baja dominó el sector oeste de Norteamérica, desde el sur de Canadá hasta alcanzar la línea ecuatorial sobre las Islas Galápagos, cubiendo un amplio sector del Pacífico nororiental y Centroamérica, tal como se observa en la figura 8 izq. arr. Esa configuración de la presión hizo que las placas del Pacífico y del Coco (figura 8 der. ab.) (NRL, 2008), se vieran sometidas desde esa fecha al dominio de anomalías de la componente zonal del viento, en sentido oeste-este. El segundo aspecto importante surgió de la aparición de la tormenta tropical Alma en las cercanías de Centroamérica, la cual inició su desarrollo a unos 350 km hacia el suroeste de la costa de Nicaragua, en una amplia zona de la convergencia intertropical, acentuando las anomalías de baja presión y viento antes mencionadas. De acuerdo a Brown (2008), la formación de Alma en esa zona geográfica se considera un récord por ser el único sistema de este tipo que se ha formado en esas aguas, desde que inició el registro de ciclones tropicales en el año 1949.

El día 28 de mayo a media noche la perturbación alcanzó el grado de depresión tropical a unos 135 km mar adentro de Cabo Blanco, poblado situado en el noroeste de Costa Rica y el día 29 ya con categoría de tormenta tropical, “Alma” tocó tierra justo al suroeste de León, Nicaragua (figura 8 der. arr.) (Wikipedia, 2018a). Era la primera vez que un disturbio tropical con intensidad de tormenta tropical del Pacífico Nororiental tocaba tierra en un país centroamericano, ya que siempre lo habían hecho más al norte en las costas mexicanas o de Estados Unidos.

Lo anterior, tuvo como resultado que una gran parte de las placas tectónicas del Pacífico y del Coco, quedasen dominadas por anomalías de la componente zonal del viento apuntando en sentido oeste-este, mientras que sobre la placa de Nazca dichas anomalías actuaran en sentido contrario, como lo muestran las figuras 8 izq. ab. O sea, la formación de Alma fortaleció en las últimas horas el patrón de anomalías de la componente zonal del viento, configuración que como un todo se mantuvo por espacio de unas 168 horas (siete días), en un espesor de 1 km de altura (1000 hPa), lapso en el cual la isolínea cero de dichas anomalías se mantuvo acoplada con el sitio de la erupción volcánica.

Es importante mencionar, que en los trópicos profundos las anomalías atmosféricas en los acoples troposfera-litosfera se limitaron a capas de muy poco espesor, a diferencia de latitudes medias y altas.

La formación de la tormenta tropical Alma y el acople en el disparo de la erupción del volcán Cerro Azul, es muy similar a lo narrado en el caso del tifón Yunya en la erupción del volcán Pinatubo. En ambos casos, primero hubo un largo periodo con anomalías de baja presión y viento actuando sobre las regiones de los volcanes. Luego, en los días cercanos a la erupción se formó un disturbio tropical mayor, que se acopló con los campos anómalos preexistentes.

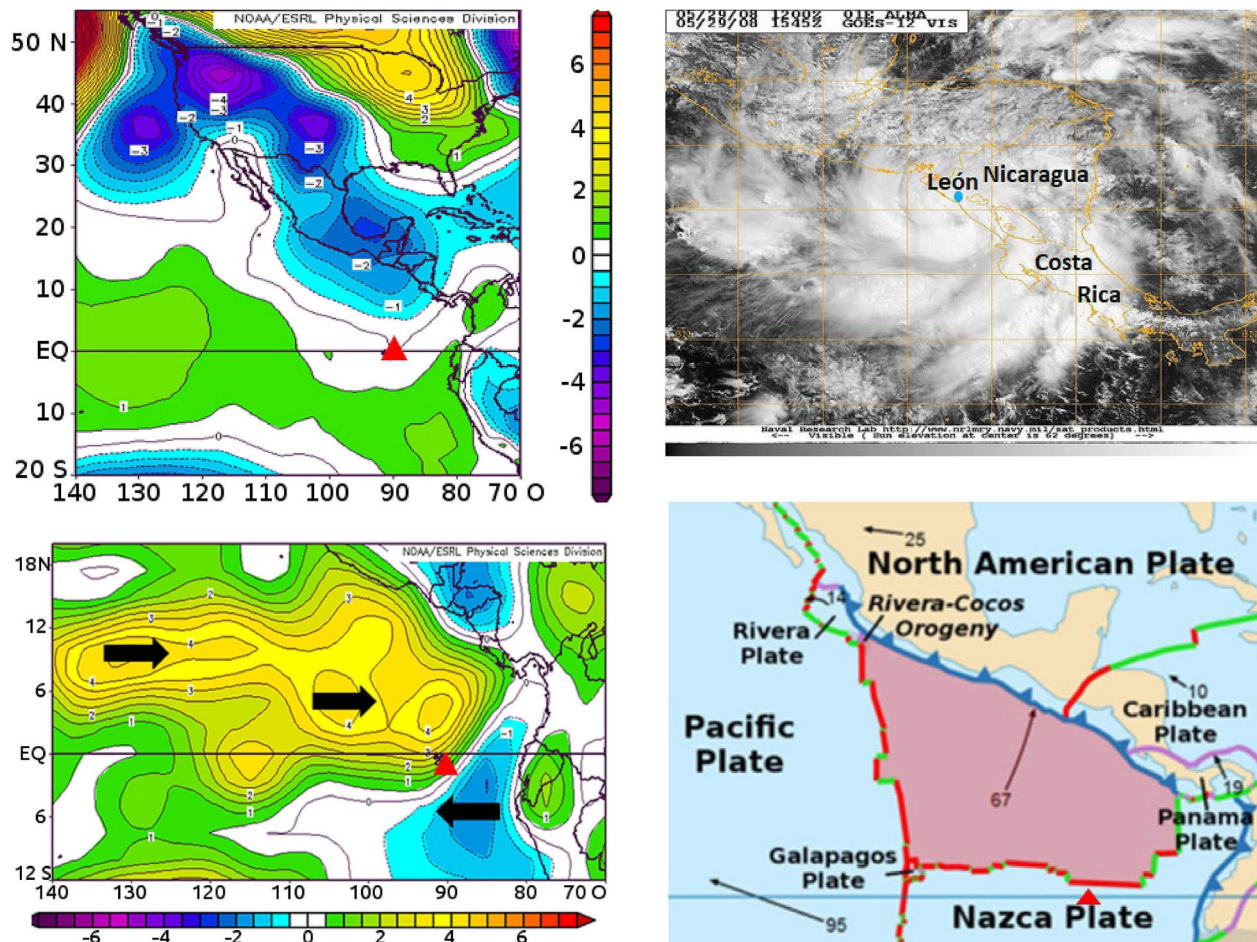


Figura 8. Para el periodo 23-29 de mayo de 2008: izq. arr: anomalías de la presión al nivel del mar e izq. ab: anomalías de la componente zonal del viento al nivel de 1000 hPa (0.5 km). Der. arr: tormenta tropical Alma alcanzando León, Nicaragua (punto celeste agregado a la figura original). Der. ab: placas tectónicas (se adiciona el triángulo a la figura original). Flechas negras: desplazamientos relativos de las placas en mm/año.

3.6. Volcán Soufriere Hills, Isla de Monserrat, Antillas Menores

Esta erupción volcánica tuvo lugar el 18 de julio de 1995. Este volcán se localiza en el arco de las Antillas Menores en el Mar Caribe (16°43'N 62°11'W), en la intersección de las placas tectónicas del Caribe, Norteamérica y Suramérica (figura 9 izq. arr.) (Wikipedia, 2018b).

La erupción fue la primera del Soufriere Hills desde su última actividad en el siglo XIX (Pelinsonsky, 2004), alcanzando un Índice de Explosividad Volcánica de 3. Las anomalías

del potencial de la velocidad en el nivel sigma .1682, para el periodo del 15 al 18 de julio de 1995, mostraban un número de onda zonal 2 y un valor de $-3.0 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ (zona de ceros) sobre el área del volcán. El campo sinóptico mostró una onda tropical transitando hacia el oeste desde las Antillas Menores, el día 12 de julio y cuya parte vortical más activa (giro antihorario) se fue desplazando justo al norte de Puerto Rico, Haití, República Dominicana y Las Bahamas hasta el día 17, para luego girar hacia el noroeste el día 18. El mapa compuesto para las anomalías de la presión atmosférica en superficie, en el periodo 14-17 de julio mostrado en la figura 9 der. arr,

identifica la onda tropical (OT), formando parte de una zona de baja presión mucho más vasta, que dominó buena parte del Océano Atlántico durante el mismo periodo.

Desde el punto de vista climático, lo normal en el mes de julio es que la placa tectónica del Caribe y la parte sur de la placa de Norteamérica estén bañadas por un flujo alisio bastante definido, con dirección hacia el oeste (vientos alisios) como lo muestra la figura 9 izq. ab. Como se puede observar, las mayores velocidades de los vientos alisios en este mes se alcanzan en el centro-oeste del Mar Caribe, lo que se ha denominado como Chorro de Bajo Nivel del Mar Caribe (Amador

1998). Debido a la presencia de la onda tropical, las anomalías de la componente zonal del viento en el periodo 14-17 de julio, actuaron en sentido de oeste a este, sobre la placa tectónica del Caribe (figura 9 der. ab.), lo que debe interpretarse como una disminución en la intensidad de los vientos alisios sobre dicha placa, mientras que al este de las Antillas Menores las anomalías actuaron en sentido contrario sobre la placa de Norteamérica, quedando el volcán Sufriere Hills próximo a la isolínea de valor cero. Este caso muestra que una configuración atmosférica no muy intensa como una onda tropical, también pueden ser importante en los procesos de acople entre la atmósfera y la tierra sólida.

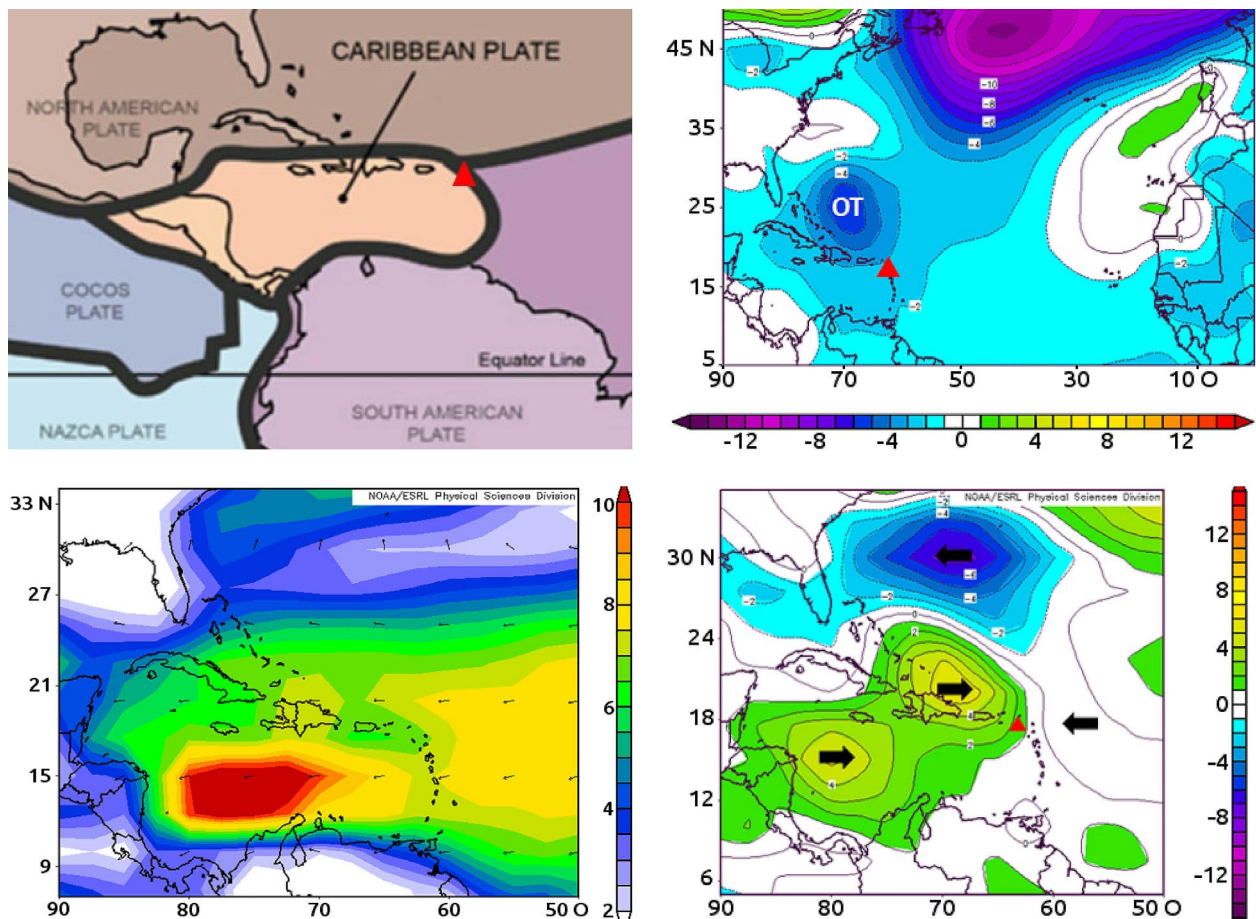


Figura 9. Izq. arr: placas tectónicas con ubicación del volcán Sufriere Hills según triángulo rojo agregado a la figura original. Para el periodo 14-17 de julio de 1995: der. arr., mapa compuesto para las anomalías de la presión atmosférica en superficie (OT-onda tropical) y der. ab., anomalías de la componente zonal del viento. Izq. ab: mapa climático del viento en superficie para el mes de julio.

3.7. Resumen de las erupciones volcánicas

En el cuadro 1 se presenta la comparación entre la erupción más violenta, la del volcán Pinatubo con un IEV de 6, con las cinco restantes, donde inclusive hay una con un IEV de 1. La intención es evidenciar que no importa qué tan violenta sea la magnitud de la erupción volcánica, los procesos troposféricos de acople con la tierra sólida son altamente similares.

El cuadro 1 muestra que los espesores de las anomalías troposféricas revelan bastante diferencia entre las zonas extratropicales y las tropicales. En los trópicos profundos las anomalías se quedan a nivel de la troposfera baja, mientras que en los extratropicos esas anomalías a veces llegan a penetrar incluso hasta la estratosfera baja, como por ejemplo la Isla Decepción,

Antártica, con 21 kilómetros de espesor. En el caso de la erupción del Pinatubo en una zona tropical, a pesar de haber alcanzado un IEV alto de 6, el espesor de las anomalías no superaron las de otros volcanes con menor IEV, pero en este caso un tifón se ubicó casi sobre el volcán a la hora de la erupción, lo que hace suponer que ayudó a lo intenso de la erupción.

En cuanto a la duración de las anomalías troposféricas, prácticamente no se encuentran diferencias importantes independientemente del lugar geográfico donde se presenten, todos los casos alcanzaron dos días o más. En lo que respecta a los giros anómalos de las circulaciones, los hay horarios y antihorarios, y cuando actúa solo una componente, esta se manifiesta de diversas formas, por ejemplo, convergencia (Mount St. Helens), o tipo cortante horizontal (Isla Decepción).

Cuadro 1. Acople entre anomalías troposféricas y las erupciones volcánicas

País o lugar	Fecha	Magnitud de la erupción volcánica (IEV)	Espesor de la anomalía del viento (km)	Duración de la anomalía del viento (horas)	Componentes del viento que actúan / tipo rotación	Placas tectónicas que intervienen
Pinatubo	15/06/1991	6	16	102	Zonal y meridional / antihoraria	Euroasiática y Filipinas
Eyjafjallajökull, Islandia	14/04/2010	4	18.5	73	Zonal / horaria	Norteamérica y Euroasiática
Isla Decepción, Antártica	23/07/1987	*	21.5	120	Zonal / horaria	Shetland y Antártica
Mount St. Helens, Estados Unidos	27/03/1980	5	12	50	Zonal / intersección de dos circulaciones	Pacífico y Norteamérica
Volcán Cerro Azul, Islas Galápagos	29/05/2008	1	1	168	Zonal / horaria	Coco, Pacífico, Nazca,
Volcán Soufriere Hills, Isla de Monserrat, Antillas Menores	18/07/1995	3	3	96	Zonal / convergencia zonal	Caribe y Norte América

* No se dispone del valor del IEV (Siebert et al., 2010).

3.8. Mecanismo de acople Troposfera-Litosfera (TL)

Zárate (2018) propuso un mecanismo Troposfera-Litosfera (mecanismo TL), para los acoples entre anomalías troposféricas y eventos sísmicos. A la luz de los hallazgos encontrados en este trabajo, este mecanismo funciona de manera idéntica también para los acoples entre las anomalías troposféricas y las erupciones volcánicas, por lo que el criterio se adopta en toda su extensión, excepto que la redacción se adecúa para las erupciones volcánicas, tal como se enuncia a continuación:

“Anomalías troposféricas en la presión atmosférica y en el viento que actúan sobre vastísimas áreas geográficas, como parte de la circulación general de la atmósfera, y que ocupan grandes espesores verticales durante varios días consecutivos, se acoplan con sitios volcánicos antes y durante las erupciones volcánicas, para el disparo de la energía que los procesos geológicos han ido acumulando en dichos sitios en periodos de pocos años, décadas o centurias”.

4. CONCLUSIONES

En términos generales las anomalías atmosféricas que se observan en la troposfera (desde la troposfera baja hasta la superior), parecen acoplarse con las erupciones volcánicas a través de cuatro características muy repetitivas como para considerarlas meras casualidades: a) el campo planetario de las anomalías del potencial de la velocidad en el nivel Sigma .1682, muestra gran organización con números de onda zonal uno o dos; b) los sitios de las erupciones volcánicas se ubican preferentemente en las denominadas “zonas de ceros” o en las “zonas de cambio de orden de magnitud” del campo de las anomalías del potencial de la velocidad; c) las anomalías troposféricas en la escala sinóptica están presentes al menos 50 horas antes de las

erupciones volcánicas; d) en latitudes medias y altas las anomalías troposféricas están muy bien acopladas en la vertical desde la troposfera baja hasta la superior, mientras que en latitudes tropicales los acoples se observan en la troposfera baja.

Lo primero que resalta a lo largo del trabajo es que existe un patrón en la localización de las erupciones volcánicas con respecto a las anomalías troposféricas. Cuatro de las seis erupciones analizadas se localizaron en la “zona de ceros”, en el campo de las anomalías del potencial de la velocidad (un caso quedó ligeramente por debajo del límite inferior de dicha zona), mientras que una se localizó en la “zona de cambio de orden de magnitud”. En los seis casos, los aparatos volcánicos que produjeron las erupciones se ubicaron sobre, o casi sobre la isolínea de valor cero de las anomalías de las componentes zonal o meridional del viento. Zárate (2018) encontró este mismo comportamiento entre la sismicidad y las anomalías troposféricas, y le llamó en forma coloquial “la danza de los ceros”, con la finalidad de llamar la atención de tan singular hallazgo.

Si bien hace ya mucho tiempo se conoce que las erupciones volcánicas se localizan en las proximidades o a lo largo de las fosas y fallas tectónicas, y así lo demuestran los mapas mundiales de dichos eventos, lo que se plantea como novedoso en este trabajo, es que no bastarían estas estructuras geológicas por sí solas para el disparo de las erupciones volcánicas, sino que parece requerirse del concurso de las anomalías troposféricas para completar el mecanismo de disparo de las mismas.

Aun cuando las erupciones volcánicas estudiadas mostraron Índices de Explosividad Volcánica altos, medios y bajos, todos los acoples encontrados entre las anomalías de los campos troposféricos y los eventos eruptivos de la tierra sólida resultaron altamente similares, lo que deja poco margen para pensar que son meras casualidades.

En latitudes medias y altas las erupciones volcánicas se asociaron mayoritariamente con anomalías encontradas en ondas largas, formadas en las corrientes en chorro de la troposfera alta. En latitudes tropicales parece que las oscilaciones Madden-Julian (MJO) juegan un papel importante en el disparo de las erupciones.

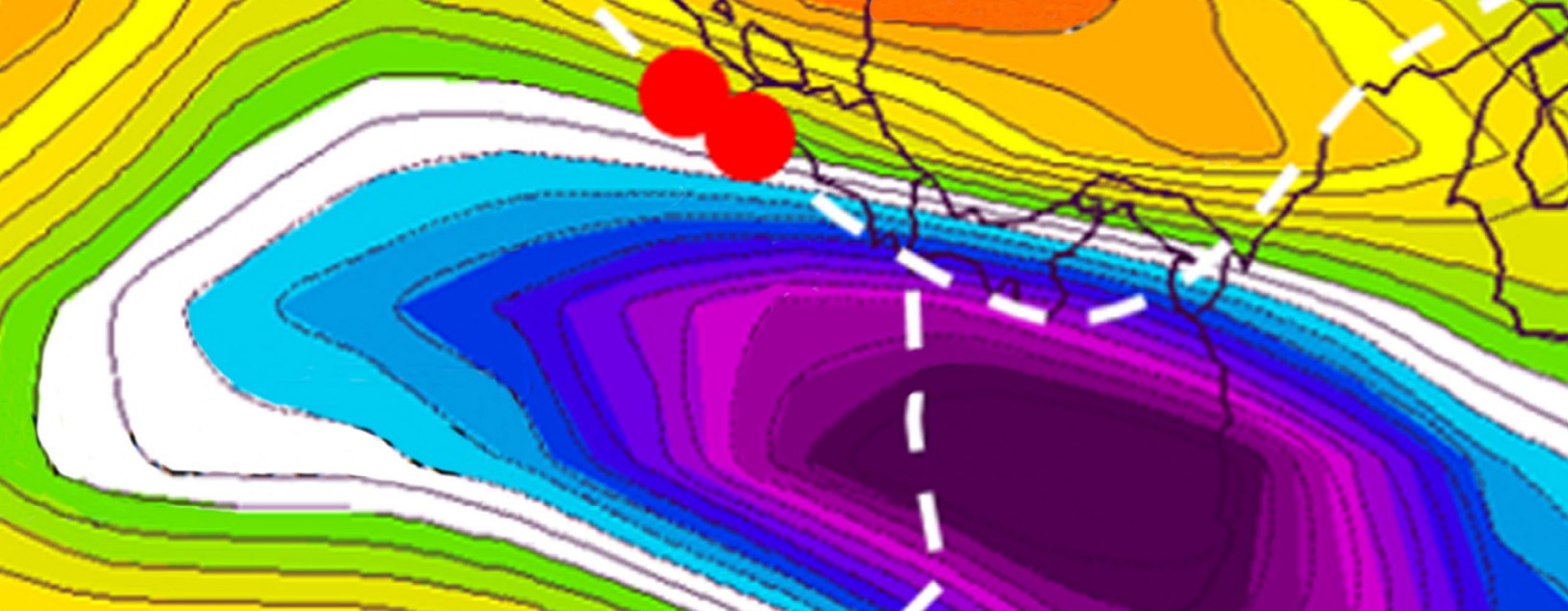
De los hallazgos encontrados en este trabajo más aquellos contenidos en Zárate (2018) para los acoples troposféricos y la sismicidad, se infiere que existe una estrecha interrelación entre las erupciones volcánicas y la sismicidad con el momento angular tierra-atmósfera y la Longitud del Día, a través de la circulación general de la atmósfera. De hecho, las ondas largas en latitudes medias y las oscilaciones MJO en los trópicos, son dos de los grandes pilares de la circulación de la atmósfera.

Dado que la circulación general de la atmósfera está sufriendo los embates del cambio climático de origen antropogénico, tal como lo menciona el Quinto Informe de Síntesis del IPCC (2013), habría que pensar que a la luz de lo aquí presentado, el comportamiento de la tierra sólida también estaría sometida a cambios en su interacción con el accionar atmosférico.

5. REFERENCIAS

- Amador, JA. (1998). A climatic feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, Vol. 5 (2).
- Australian Government. (2018.). *Madden-Julian Oscillation (MJO)*. Recuperado de: <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>.
- Brown, D. (2008). *Tropical Cyclone Report, Tropical Storm Alma*, (EP012008). 29-30 May 2008. National Hurricane Center, NOAA.
- DOMEX. (2011). *Velocity Potential-MJO*. Recuperado de: <https://sites.google.com/a/domex2011.com/domex2011/velocity-potential>.
- Free map viewer. (s.f.). *Mapa de Filipinas*. Recuperado desde: http://www.freemapviewer.com/es/map/Mapa-Filipinas_760.html.
- Klotzbach, PJ. (2014). The Madden-Julian Oscillation's Impacts on Worldwide Tropical Cyclone Activity. *Journal of Climate* 27. Fort Collins, Colorado, DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00483.1>.
- Krishnamohan KS. (2012). *The influence of Madden-Julian Oscillation in the genesis of North Indian Ocean tropical cyclones*. Affiliated with Department of Atmospheric Sciences, Cochin University of Science and Technology.
- Mo, KC. (2000). The association between intraseasonal oscillations and tropical storms in the Atlantic basin. *Mon. Wea. Rev.*, December 2000.
- NOAA/ESRL. (s.f.). *Daily and 6-hourly Mean Composites*. Physical Sciences Division. Recuperado de: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/day/>.
- NRL (2008). *Satellite Meteorology*. Naval Research Lab, Monterey Marine Meteorology Division. Recuperado de: https://www.nrlmry.navy.mil/sat_products.html.
- Pelinovsky, E.; Zahibo, N.; Dunkley, P.; Edmonds, M.; Herd, R.; Talipova, T.; Koselkov, A. & Nikolkina, I. (2004). *Tsunami Generated by the Volcano Eruption on July 12-13, 2003 at Montserrat, Lesser Antilles*. American Geophysical Union, Spring Meeting 2004. Abstract id. OS13A-02.
- Siebert, L.; Simkin, T. & Kimberly, P. (2010). *Volcanoes of the World*. Third Edition, Smithsonian Institution, University of California Press.
- Sottili, G.; Palladino, D.; Cuffaro, M. & Doglioni, C. (2015). *Earth's rotation variability triggers explosive eruptions in subduction zones*. *Earth, Planets and Space* 201567:208. DOI: 10.1186/s40623-015-0375-z.

- USGS. (s.f). *Volcanoes can affect the Earth's climate*. Science for a Changing World. Recuperado de: https://volcanoes.usgs.gov/vhp/gas_climate.html.
- Ventrice, MJ.; Wheeler, MC.; Hendon, HH.; Schreck, CJ.; Thorncroft, CD. & Kiladis, GN. (2013). A modified multivariate Madden–Julian oscillation index using velocity potential. *Mon. Wea. Rev.* 5(2):1–13. 141, 4197–4210, doi:10.1175/MWR-D-12-00327.1.
- Wheeler, MC. & Hendon, H. (2004). An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Weather Rev.*, 132:1917–1932, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2).
- Wikipedia, (s.f.a). *Typhoon Yunya 1991*. Recuperado de: https://en.wikipedia.org/wiki/1991_Pacific_typhoon_season.
- Wikipedia. (s.f.b). *Mid-Atlantic Ridge/notable features*. Recuperado de: https://en.wikipedia.org/wiki/Mid-Atlantic_Ridge.
- Wikipedia. (2015). *Shetland Plate*. Recuperado de: https://en.wikipedia.org/wiki/Shetland_Plate.
- Wikipedia. (2018a). *Cocos Plate*. Recuperado de: http://en.wikipedia.org/wiki/Cocos_Plate.
- Wikipedia. (2018b). *Placa del Caribe*. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Placa_del_Caribe.
- Zhang, C. (2013). *Madden–Julian Oscillation: Bridging Weather and Climate*. AMS, DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00026.1>.
- Zárate, E. (2018). Acoples atmósfera – tierra sólida observados en las zonas epicentrales de grandes y pequeños sismos. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. Vol 17: 1.



Instituto Meteorológico Nacional

Sitio web:
www.imn.ac.cr

Teléfono: (506) 2222 5616

Apartado postal: 5583-1000
San José
Costa Rica

