

Sismotectónica en Costa Rica

OVSICORI Universidad Nacional

NOVIEMBRE, 2021

Resumen — Un total de 828 temblores con magnitud momento (M_w) entre 0,0 y 6,2 fueron localizados manualmente por la red sismográfica del OVSICORI-UNA durante el mes de noviembre de 2021, lo que corresponde a una reducción del 26 % en la cantidad de sismos con respecto al mes anterior. La mayoría de estos eventos fueron ubicados a lo largo de la zona de subducción, especialmente en los segmentos sísmicos de Papagayo y Osa-Burica, donde el comportamiento heterogéneo de los sistemas de fallas permite que la interacción entre los procesos sísmicos y asísmicos modulen la deformación de la corteza terrestre a poca profundidad, y definan las regiones propensas a generar grandes rupturas en un futuro cercano. Actuales investigaciones realizadas por el personal del OVSICORI-UNA, usando tanto sistemas de localización de GNSS y ruido sísmico ambiental, demuestran que los sismos lentos juegan un papel importante en el control de los niveles de tensión y condiciones de fricción de las fallas, promoviendo y/o limitando rupturas dinámicas. Esta información es crucial para entender tanto la física de las fallas, como para el manejo del riesgo sísmico.

Palabras clave — Sismos Lentos, Ruido Sísmico Ambiental, Segmento de Papagayo, Osa-Burica.

Abstract — A total of 828 earthquakes with moment magnitude (M_w) ranging from 0.0 up to 6.2 were located manually by the seismological network operated by OVSICORI-UNA in Costa Rica during November 2021, corresponding with a 26 % reduction in the amount of earthquakes with respect to the previous month. A great majority of these events, concentrated mainly along the NW and SE subduction zones, commonly known as the Papagayo and the Osa-Burica seismic segments, respectively, are responding to the heterogeneous behavior of fault systems, where an intermingle of seismic and aseismic processes modulate the crustal deformation at shallow depth and then define the regions prone to host large ruptures in the near future. Current investigations at OVSICORI-UNA, using both GNSS and ambient seismic noise, demonstrate that slow slip events play a major role controlling strain rates and frictional conditions at faults, promoting and/or halting dynamic ruptures. This information is crucial for understanding fault physics and hazard assessment.

Keywords — Slow Earthquakes, Seismic Ambient Noise, Papagayo Block, Osa-Burica.

SISMICIDAD EN COSTA RICA

Un total de **828** sismos fueron localizados manualmente por la red sismográfica del **OVSICORI-UNA** durante el mes de noviembre de 2021 (figura 1). De estos, 9 fueron reportados como sentidos por la población nacional mediante las redes sociales del Observatorio en Facebook y Twitter. La distribución espacial de la sismicidad (círculos) del mes se muestra en la figura 1, donde el tamaño y color de los círculos representan su magnitud y profundidad, respectivamente. En color rojo se muestran además, los sismos que, ya sea por

sus características sismotectónicas, o bien, por los reportes de percepción de la población han sido destacados en el mes de noviembre. Junto con estos se muestra su mecanismo focal o bola de playa, la cual explica la cinemática promedio de la falla causante durante el deslizamiento co-sísmico.

La cantidad de sismos localizados en noviembre de 2021 iguala a la cantidad de eventos localizados hace exactamente 1 año (en noviembre de 2020), y en general, representa una reducción aproximada del 26 % con respecto a la sismicidad localizada manualmente durante el mes de octubre de 2021 (figura 2). Dicha disminución, tanto en la cantidad de sismos localizados como en la cantidad de sismos sentidos, concuerda con la tendencia o distribución mensual histórica de sismicidad en el catálogo del **OVSICORI-UNA** desde 2010 (figura 3).

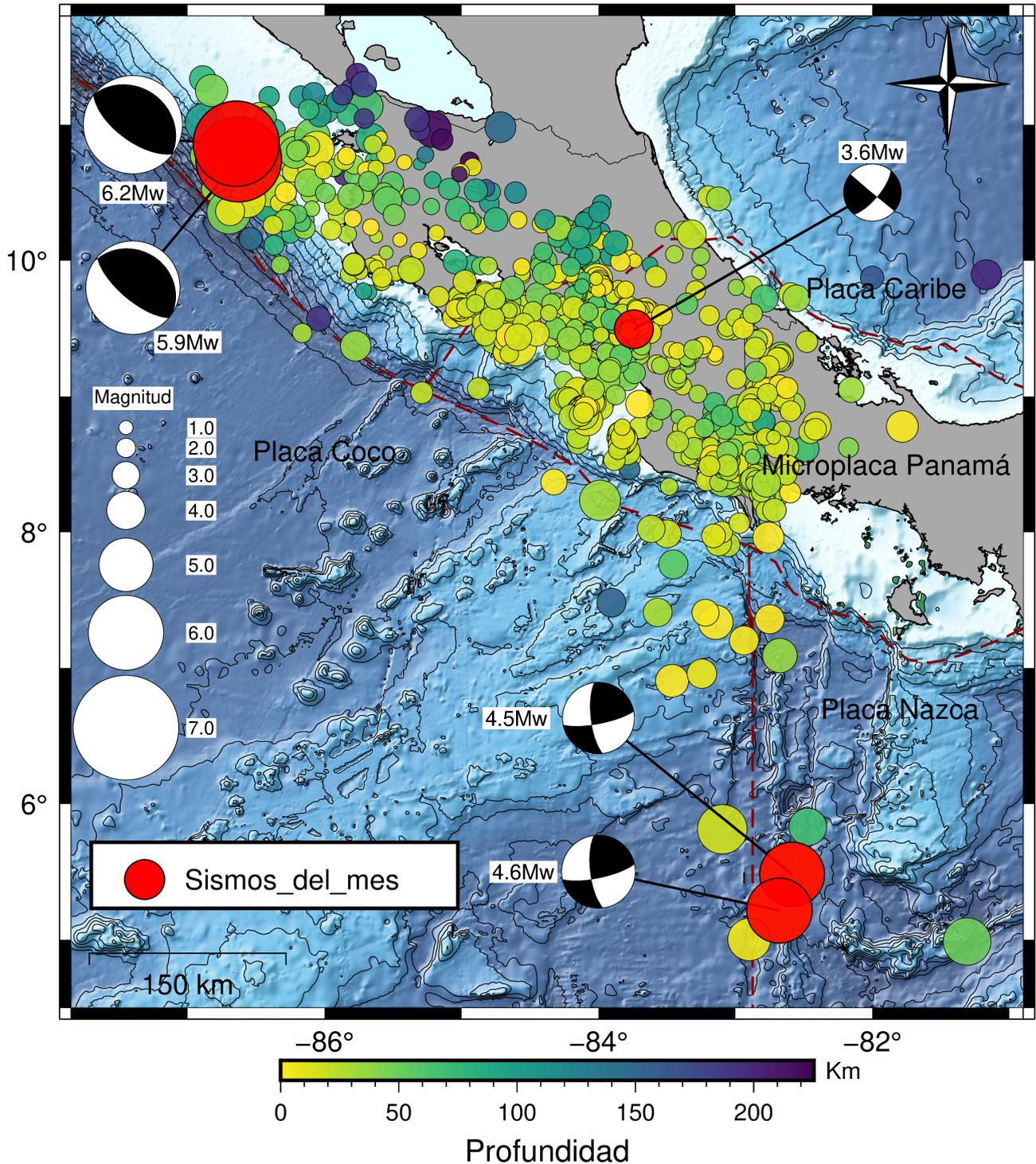


Figura 1: Mapa mostrando la distribución hipocentral de la sismicidad en Costa Rica durante el mes de noviembre de 2021. En la figura, el color y tamaño de los círculos representa la profundidad y magnitud de los sismos, respectivamente. Los eventos en color rojo corresponden con los sismos destacados del mes.

El listado completo que incluye la ubicación, el tiempo de origen, la magnitud y la profundidad de los sismos sentidos, puede ser revisado de manera gratuita por medio de la página web del OVSICORI-UNA: <http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php/sismos-sentidos>.

Durante el mes de noviembre, el día con la mayor cantidad de sismos localizados fue el 23, con un total de 49 eventos, mientras que el día con menos eventos registrados y localizados fue el 25, únicamente con 14 sismos (figura 4). El

sismo de mayor magnitud, $M_w = 6,2$, se generó el día 09 a las 12:25, hora local, cuyo epicentro se ubicó 98 km hacia el Noroeste de Santa Elena en Guanacaste (frente a las costas de San Juan del Sur en Nicaragua) y tuvo una profundidad de 30 km.

Este temblor fue antecedido por un sismo premonitor de magnitud, $M_w = 5,9$, que se generó 4 horas antes de la ocurrencia del evento principal, de magnitud $M_w = 6,2$, y se ubicó en la misma región hipocentral. En general, la ocurrencia

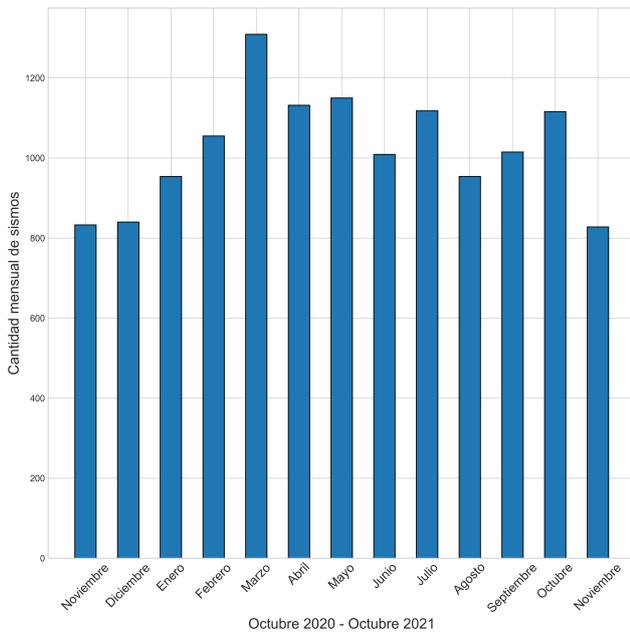


Figura 2: Cantidad mensual de sismos desde noviembre del 2020 a noviembre del 2021.

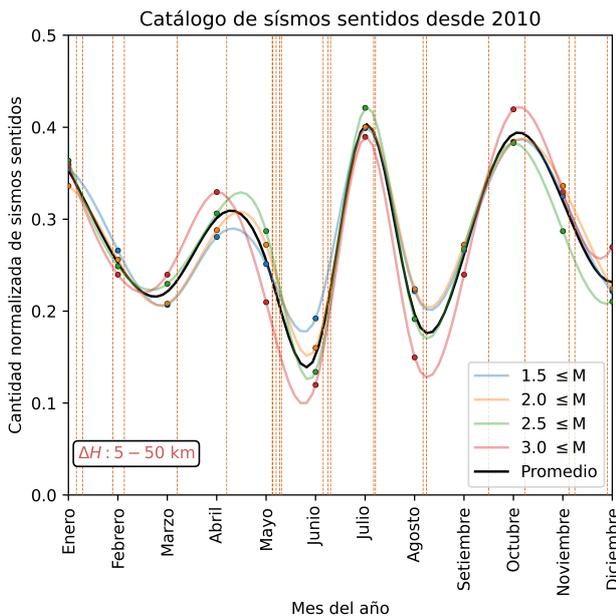


Figura 3: Conteo mensual de sismos sentidos en Costa Rica desde 2010 al mes de noviembre del 2021.

de estos dos eventos responde a la geodinámica de subducción de la Placa del Coco por debajo de la placa del Caribe en una región marcada por una transición fuerte en sus propiedades de fricción debido a la presencia abundante de sedimentos y fluidos que modifican las propiedades mecánicas de la interfaz entre la Placa del Coco y la Placa del Caribe. Más adelante se detalla sobre la sismotectónica del segmento sísmico de Papagayo, hacia el NW de Costa Rica, donde se generaron los eventos mencionados anteriormente.

Las regiones sísmicamente más activas del mes de noviembre fueron 1) el segmento sísmico Osa-Burica: región que incluye la Península de Osa y la Península de Burica y

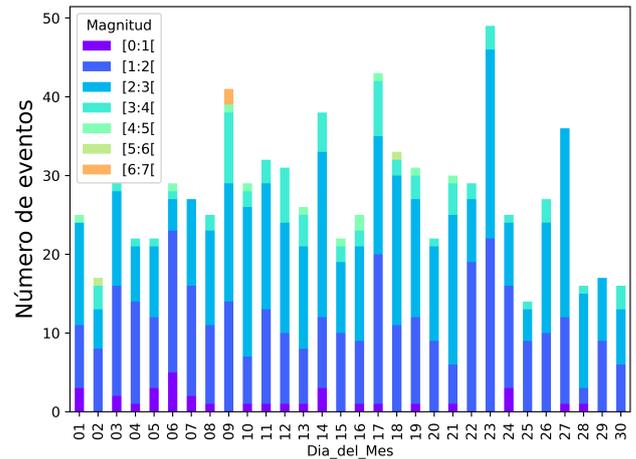


Figura 4: Conteo diario de los sismos localizados manualmente por el OVSICORI-UNA durante el mes de noviembre del 2021.

2) el segmento sísmico de Papagayo, precisamente entre el golfo de Santa Elena y San Juan del Sur en Nicaragua.

ACTIVIDAD SÍSMICA Y ASÍSMICA

Con la creciente expansión y modernización de la instrumentación geodinámica que el OVSICORI-UNA opera en todo Costa Rica es posible observar y registrar con alta precisión, además de la generación de temblores, la deformación de la corteza terrestre. Generalmente, durante la ocurrencia de procesos transitorios que exhiben deslizamientos dinámicos (como los terremotos), la deformación cortical puede alcanzar amplitudes del orden de metros. Sin embargo, cuando el deslizamiento o desacople a lo largo de fallas o sistemas de fallas ocurre de manera cuasi-estática, es decir, de manera muy lenta en el tiempo, estas deformaciones tienden a ser relativamente pequeñas, en el orden de milímetros o centímetros, dependiendo de la distancia relativa entre el punto de observación y la fuente de deformación.

Los sismos lentos, al igual que los terremotos son deslizamientos a lo largo del plano de falla. Sin embargo, estos eventos tienen una duración de días, semanas o hasta meses, mientras que los terremotos “convencionales” presentan una duración de segundos hasta unos pocos minutos. Además, por su comportamiento cuasi-estático, los sismos lentos no generan radiación sísmica y por lo tanto no producen aceleraciones en superficie que puedan ser percibidas por la población, tal y como sí ocurre en el caso de los temblores “convencionales”.

Los sismos lentos han sido observados a lo largo de múltiples zonas de subducción del circumpacífico p.Ej., (Schwartz and Rokosky, 2007; Douglas et al., 2005; Dragert et al., 2001; Larson et al., 2004; Obara et al., 2004; Ohtaa et al., 2006; Outerbridge et al., 2010). En Costa Rica, particularmente, estos han sido muy bien caracterizados por medio de mediciones continuas de estaciones GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite, por sus siglas en inglés) al noroeste del país, principalmente en los segmentos sísmicos de Nicoya y Cóbano-Herradura (Dixon et al., 2014; Voss et al., 2017; Xie et al., 2020). Recientemente, gracias a la expan-

sión de la red de monitoreo geodinámico de Costa Rica, este tipo de eventos está siendo registrado de igual manera en la Zona Sur de nuestro país, en el segmento sísmico Osa-Burica.

El uso de las mediciones continuas de GNSS, ha probado ser un método muy robusto para monitorear las deformaciones de la corteza terrestre generadas, por ejemplo, por la compresión impuesta sobre la corteza continental debido al proceso de subducción de la Placa oceánica, o bien, por procesos localizados a lo largo de sistemas de fallas, como la acumulación o relajación de esfuerzos tectónicos, sismos lentos y otros procesos asísmicos.

Este método permite además, comprender mejor cómo los esfuerzos son distribuidos en profundidad (o el ancho de la falla) y en función de la longitud de la falla. Resulta además de gran importancia para comprender mejor la relación y/o interacción existente entre los procesos sísmicos y asísmicos en una región determinada.

Por otro lado, gracias al mejoramiento continuo en la tecnología instrumental y computacional durante los últimos 10 años, por **primera vez** en la historia sismológica de Costa Rica, el **OVSICORI-UNA** ha registrado la huella sísmica de **al menos 3** sismos lentos que han ocurrido en la Zona Sur del País desde inicios de 2021, mediante la implementación de un método de análisis de datos conocido como la correlación cruzada de ruido sísmico ambiental, este método permite medir cambios en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas superficiales (ondas sísmicas de tipo Rayleigh) mientras estas viajan por la corteza terrestre. Previamente la única forma de detectar sismos lentos era por medio de GNSS.

Dichos cambios obedecen a variaciones estructurales del medio (o bien, cambios en la atenuación de la roca) por el cual se propagan y fueron generadas en respuesta a procesos transitorios de estrés, como la ocurrencia de temblores y/o sismos lentos (Chaves and Schwartz, 2016).

Esta novel observación, aplicando correlación cruzada de ruido sísmico ambiental, ha sido registrada y documentada sólo dos veces en el mundo: 1) en la zona de subducción de Guerrero en México (Rivet et al., 2011, 2014) y 2) en el segmento sísmico Osa-Burica, en Costa Rica (con el presente boletín).

¿Qué es el ruido sísmico?

El ruido sísmico ambiental consiste en una señal de fondo, distinta a la generada por los temblores, que es continuamente registrada por los sismógrafos instalados en todo el país. Esta señal se genera por la interacción existente entre el oleaje y el suelo oceánico, produciendo un campo de ondas aleatorio que se propaga con un periodo fundamental de 6 segundos.

La correlación cruzada del ruido sísmico entre dos puntos (dos estaciones sismológicas) en la superficie terrestre permite extraer una fase coherente que se conoce como función de Green. Y es mediante la comparación diaria de estas funciones de Green que se puede extraer información sobre la estructura y las propiedades mecánicas de la Tierra sólida por donde las ondas sísmicas se propagan (Lobkis and Wea-

ver, 2001; Campillo and Paul, 2003; Shapiro and Campillo, 2004; Snieder, 2004; Shapiro et al., 2005).

¿Por qué es importante monitorear sismos lentos?

Las fallas tectónicas son sumamente heterogéneas, presentando una alta variabilidad geométrica y/o de fricción, así como también cambios laterales o en profundidad en su reología, temperatura y contenido de fluidos. Dichas condiciones modulan el comportamiento sísmico y asísmico de diferentes regiones en el plano de falla. Las asperezas cuyas propiedades de fricción son de tipo “sísmicas”, generan temblores convencionales, irradiando ondas sísmicas.

Por el contrario, las asperezas cuyas propiedades de fricción son de tipo “asísmicas”, presentan un deslizamiento condicionado que depende, entre otros factores, de la tasa de carga sobre la falla durante el ciclo sísmico. De manera que, estas regiones tienen la capacidad de hospedar tanto sismos lentos como rupturas dinámicas.

Cuando ocurren sismos lentos, estos pueden modificar las condiciones de estrés de las regiones circundantes, abriendo paso a dos escenarios principales: 1) un incremento en tensión a lo largo de los márgenes de asperezas sísmicas o áreas efectivas de contacto en el plano de falla, acelerando el proceso de ruptura de estas y por lo tanto disparando sismos de magnitud importante, o bien, 2) relajando los esfuerzos y retardando el proceso de ruptura del próximo terremoto.

Comprender la interacción entre los procesos sísmicos y asísmicos es sumamente importante para establecer con precisión el potencial sísmico existente en una región particular y con base en esto, crear mejores planes de riesgo, atención de posibles emergencias y ordenamiento territorial.

Dos zonas en Costa Rica donde actualmente ocurren sismos lentos y en donde estos podrían estar modificando las condiciones de estrés a lo largo del plano de falla son: a) el segmento sísmico de Papagayo y b) el segmento sísmico Osa-Burica. A continuación resumimos observaciones recientes para estas dos regiones.

SEGMENTO SÍSMICO DE PAPAGAYO

EL proceso de subducción de la placa del Coco por debajo de la placa del Caribe es la fuente principal de actividad sismotectónica en la región que comprende el segmento sísmico de Papagayo (Figura 6), ubicado entre el Parque Nacional Santa Rosa y el Pacífico Sur de Nicaragua. En esta región existe el potencial de ocurrencia de sismos de magnitud momento (M_w) mayor o igual a 7,0, como el pasado terremoto y tsunami ocurrido el 2 de setiembre de 1992, con magnitud, $M_w = 7,6$. El cual ha sido estudiado extensamente.

En esta región, el material subducido de la Placa del Coco fue formado en la dorsal del Pacífico oriental y se caracteriza por ser roca más vieja, más fría, y menos rugosa, que la litosfera oceánica que se subduce por debajo del Pacífico Central

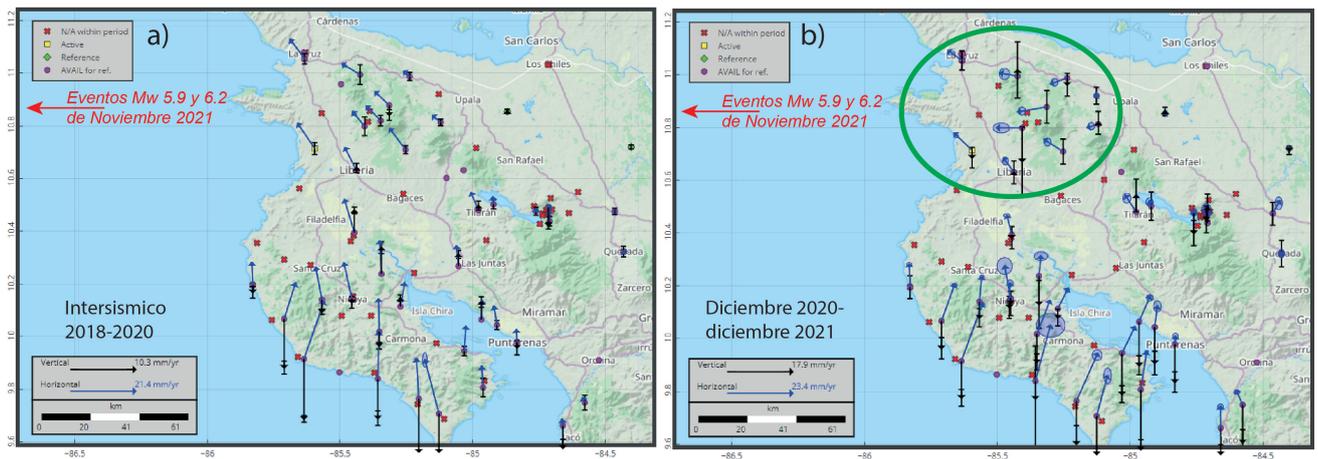


Figura 5: Velocidades de la corteza del norte de Costa Rica, medida por GNSS. a) velocidades 2018-2020. Flechas azules y su elipse muestran las velocidades horizontales y sus incertidumbres, respectivamente. Flechas negras y su barra de error muestran las velocidades verticales y su incertidumbres, respectivamente. b) velocidades diciembre 2020 a diciembre 2021. El elipse verde encierra las estaciones GNSS con un cambio de velocidades.

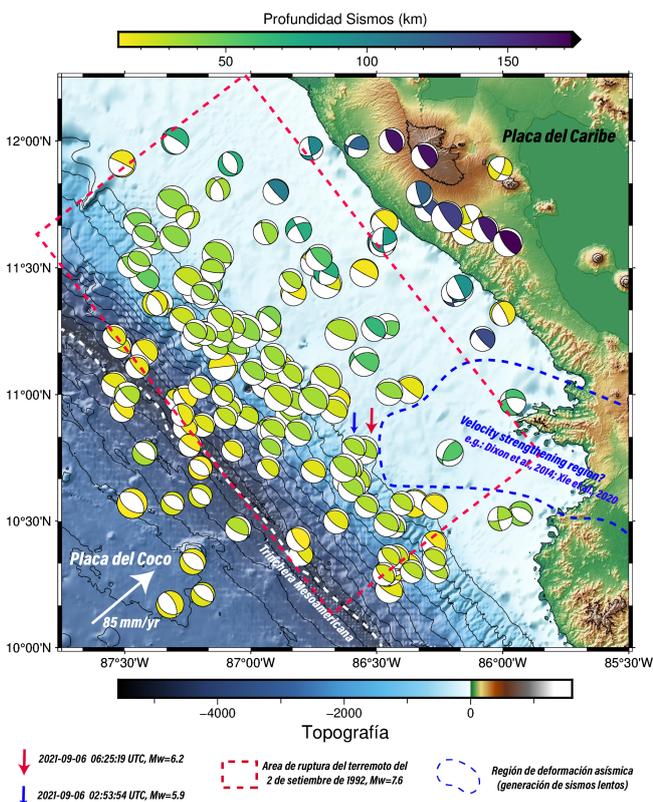


Figura 6: Mapa con la distribución hipocentral de la sismicidad histórica ($M > 5,0$), en el segmento sísmico de Papagayo. El rectángulo de color rojo corresponde con el área de ruptura del terremoto de magnitud $M_w=7,6$, ocurrido el 2 de setiembre de 1992. La región ilustrada con una línea punteada de color azul corresponde con una extensión hacia el, NW, de la zona donde varios estudios han demostrado la existencia de sismos lentos entre 35 y 50 km de profundidad.

y el Pacífico Sur costarricense, formada en el punto caliente de los Galápagos.

Múltiples estudios han destacado además (Satake, 1994; Kanamori and kikuchi, 1993; Harmon et al., 2013) la presencia de una alta variabilidad en las propiedades mecánicas de

la roca subducida, conteniendo, por ejemplo, una gran cantidad de sedimentos y regiones con alta presión de poro. Dichas condiciones son ideales para la generación de sismos tsunamigénicos y deslizamiento asísmico a lo largo de la interfaz.

Similarmente, estudios recientes p. Ej. (Bilek et al., 2016) han demostrado que la sismicidad en la zona presenta una caída de estrés relativamente baja, en respuesta principalmente a una zona de falla relativamente débil, a la poca consolidación del material, o a una combinación de ambas.

Desde finales del año 2020, se detectó un cambio en el patrón (magnitud y dirección) de la deformación cortical en el noroeste del país. Entre 2018 y 2020, las velocidades de las estaciones GNSS (Figura 5) en esta zona presentan generalmente una dirección noroeste, casi paralela a la geometría de la Trincheras Mesoamericana.

Sin embargo, desde finales de 2020 y hasta principios del mes de noviembre de 2021, justamente antes de la ocurrencia de los sismos de mayor magnitud en la región (figura 1), se observó una rotación en al menos 7 de las estaciones GNSS que monitorean el NW de Costa Rica (elipse de color verde en la figura 5, panel B). La rotación de los vectores de velocidad en dirección del segmento sísmico de Papagayo podría indicar una disminución del acoplamiento elástico generada por un proceso transitorio asísmico, como por ejemplo, un sismo lento, que ocurrió a lo largo de la interfaz donde la placa del Coco interactúa con la placa del Caribe.

El contorno punteado de color azul que se muestra en el mapa de la figura 6, resalta la región donde este sismo lento pudo haber sido generado, entre 35 y 50 km de profundidad a lo largo de la interfaz. Esta región corresponde con una extensión hacia el NW del área donde varios estudios han observado la generación de sismos lentos en Costa Rica P.Ej. (Dixon et al., 2014; Voss et al., 2017; Xie et al., 2020) y en donde al no existir actividad sísmica importante, delimita claramente el cambio o transición en las propiedades de fricción en la zona de falla.

Los sismos de mayor magnitud ocurridos en el segmento

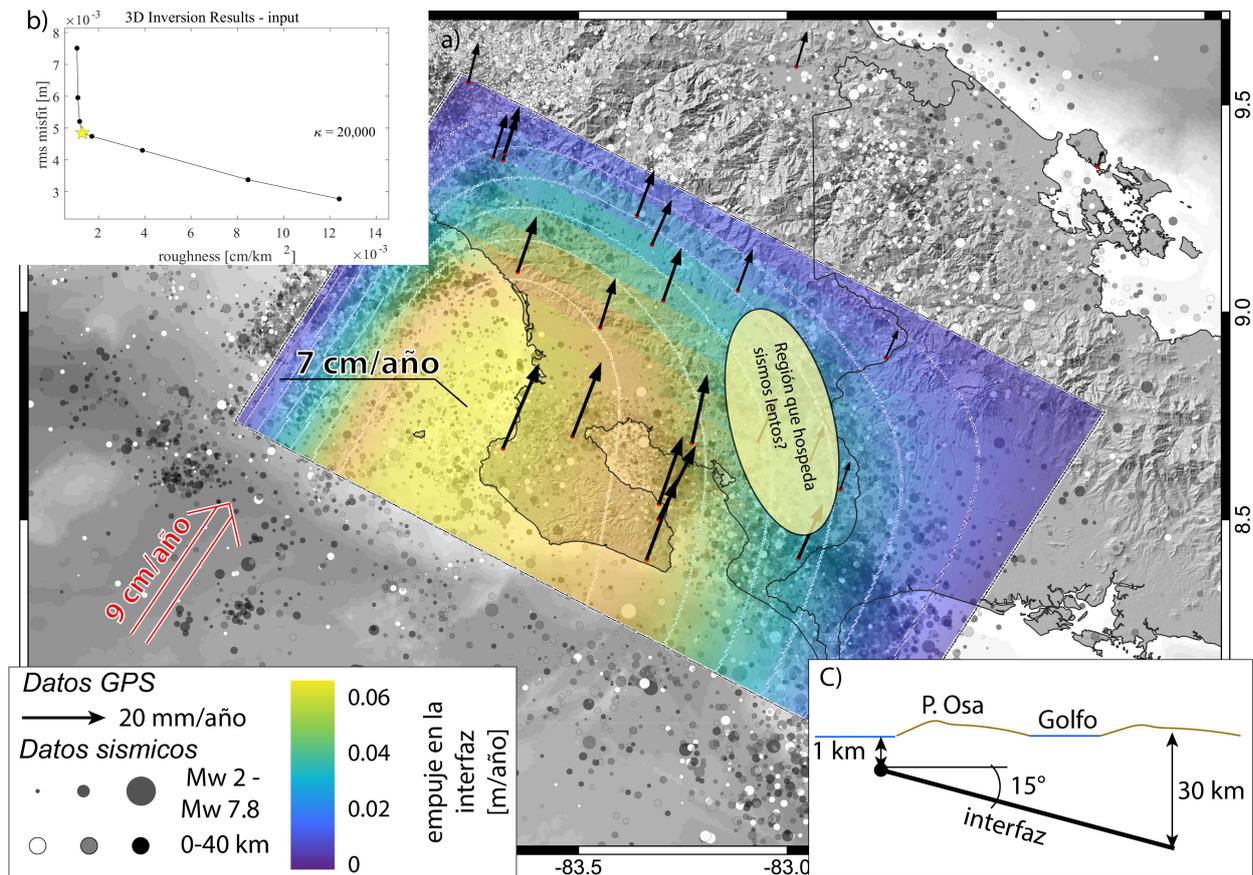


Figura 7: Resultado del modelo del empuje (thrust) en la interfaz entre la placa Cocos y la microplaca de Panamá por debajo de la península de Osa. a) La escala de color muestra la variación del empuje a lo largo de la zona de subducción. Nota: Debe comprenderse que la velocidad de 0 en los bordes del modelo no reflejan la realidad y más bien corresponden con artefactos del modelo producto de la limitación instrumental en ciertas zonas. Los vectores negros muestran la velocidad con la que las estaciones GNSS se mueven en la superficie. Los círculos indican la posición, la profundidad (escala de gris) y la magnitud (tamaño) de los sismos de la zona desde 2010. La flecha roja indica la velocidad promedio de la subducción de la placa Cocos por debajo de la placa Caribe. b) El gráfico muestra la relación del error del modelo y su grado de rugosidad. La solución elegida (estrella amarilla) optimiza ambos parámetros. c) geometría de la interfaz usado en el modelo geofísico. El elipse de color amarillo, representa la zona donde es posible que se estén generando sismos lentos.

sísmico de Papagayo durante el mes de Noviembre de 2021 (Ver Figura 1 y las flechas de color azul y rojo en la Figura 6), ocurrieron justamente en el margen oeste de este contorno en color azul, por lo que, el desacople inducido por el sismo lento en este sector de la interfaz pudo haber sobrecargado el margen adyacente de la falla, provocando la ocurrencia de los eventos sísmicos con magnitud momento (M_w) 5,9 y 6,2, respectivamente.

Es necesario investigar con mayor profundidad para corroborar la relación entre el cambio observado en los datos de GNSS y las secuencias sísmica ocurrida el día 09 del mes de noviembre de 2021.

SEGMENTO SÍSMICO OSA-BURICA

Con el propósito de comprender mejor la sismotectónica de las penínsulas de Osa y Burica durante los últimos 11 meses (Figura 1), se estudió el patrón de deformación, regiones de acoplamiento elástico y comportamiento, tanto de la interfaz donde la placa del Cocos interactúa con la microplaca de Panamá, como de la placa superior y las fallas locales pre-

sentes en la región. Para esto se hizo uso de dos metodologías principales: Los registros continuos de estaciones GNSS y la correlación cruzada de ruido sísmico ambiental entre las estaciones sísmológicas de banda ancha que el OVSICORI-UNA opera en el Sur de Costa Rica.

Utilizando los datos GNSS para la zona sur del país entre los años 2019 y 2021, se modeló el empuje o movimiento relativo de la interfaz a lo largo del segmento sísmico Osa-Burica. Para esto, se definió una interfaz con un ángulo de inclinación promedio de 15 grados, con una extensión máxima en profundidad de 30 km. La figura 7 presenta los resultados obtenidos de este modelaje, en donde los vectores (o flechas) en color negro corresponden con la velocidad a la que se están moviendo las estaciones GNSS en la superficie de la corteza, en unidades de milímetros por año.

Los contornos de color indican la magnitud del empuje (m/año) distribuido espacialmente a lo largo del plano de falla en la zona de subducción, de manera que, los colores amarillos o más claros denotan aquellas regiones en la falla desde donde se ejerce un mayor empuje hacia la superficie, mientras que los colores verde-azulados, o más oscuros, corresponden con las secciones de falla donde el empuje hacia la superficie es de menor magnitud.

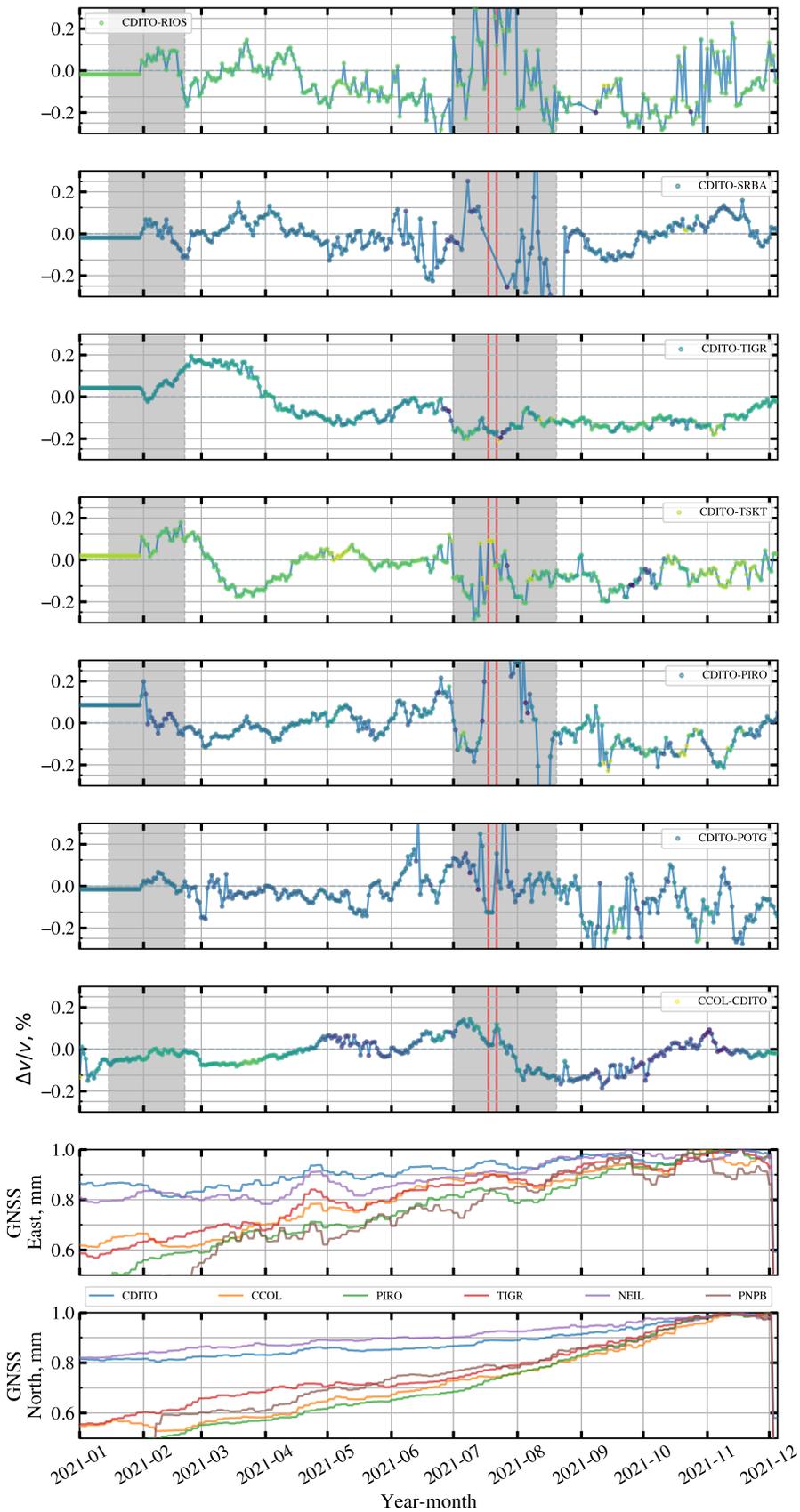


Figura 8: Paneles a) - g) cambios en la velocidad de las ondas sísmicas superficiales, obtenidos mediante la correlación de ruido sísmico en la banda con periodos de 1 - 10 s, muestreando profundidades que van desde 5 km hasta los ~ 10 km. Paneles h) e i) muestran las componentes de desplazamiento horizontal, E-W y N-S, respectivamente, de las estaciones GNSS que monitorean la deformación cortical en el Sur de Costa Rica.

Nuestros resultados demuestran que las regiones con mayor acoplamiento elástico (donde el movimiento de la interfaz es casi nulo o cero) corresponden con las áreas entre Bahía Drake y la isla del Caño, es decir, por debajo de la Península de Osa y hacia el noroeste de la Península de Osa, demarcadas por la “dona” de color amarillo (color claro) en la figura 7.

En esta región del país, la amplitud máxima del empuje de la interfaz hacia la corteza superior alcanza los 7 cm/año, entre 4 y 13 km de profundidad. Esto corresponde con un 78 % de la tasa de convergencia de la Placa del Coco con respecto a la microplaca de Panamá y significa un acoplamiento o bloqueo casi completo de la falla. Es justamente por debajo de esta región, donde en los próximos 2 a 5 años podría nuclear el próximo gran terremoto en la región Sur de Costa Rica.

Las regiones de la falla demarcadas por contornos de color verde-azulado (contornos oscuros) y cuya magnitud de empuje se encuentra entre 0,01 y 0,04 m/año, han presentado un comportamiento más dinámico ya que están menos acopladas elásticamente. Es en estas áreas en donde durante el último año ha ocurrido una gran cantidad de microsismicidad y sismos de magnitud intermedia, además de al menos 3 sismos lentos con magnitud variable.

Utilizando la correlación cruzada del ruido sísmico ambiental entre todos los pares de estaciones sismológicas de banda ancha que el **OVSI-CORI-UNA** opera en la zona, fue posible medir los cambios en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas superficiales (ondas de tipo Rayleigh) en el segmento sísmico Osa-Burica desde enero hasta finales del mes de noviembre de 2021.

Los resultados obtenidos demuestran cambios significativos en la velocidad de propagación de las ondas Rayleigh en respuesta a tres episodios principales ocurridos entre 1) enero y marzo, 2) finales del mes de abril y principios del mes de junio y 3) principios del mes de julio y finales del mes de agosto. Los paneles a-g de la figura 8 muestran el cambio en la velocidad de las ondas sísmicas en función del tiempo para los pares de estaciones: CDITO-RIOS, CDITO-SRBA, CDITO-TIGR, CDITO-TSKT, CDITO-PIRO, CDITO-POTG y CDITO-CCOL, respectivamente. En la figura 8, las líneas verticales en color rojo corresponden con la ocurrencia de los sismos de magnitud 6,2 y 6,8 ocurridos en la Zona de Fracturas de Panamá durante el mes de julio de 2021.

Los tres episodios mencionados anteriormente corresponden temporalmente con cambios en el desplazamiento horizontal (componente E-W) de las estaciones de monitoreo continuo GNSS, tal y como se muestra en los paneles h) e I) de la figura 7 y podrían corresponder con sismos lentos de magnitud variable generados a lo largo de la región marcada por la elipse en color amarillo de la figura 7 a profundidades de entre 5 y 10 km.

Anteriormente a la presente observación, cambios en la velocidad de las ondas sísmicas generados por la ocurrencia de sismos lentos habían sido observados únicamente en la zona de subducción de Guerrero en México (Rivet et al., 2011, 2014), de manera que, el presente boletín corresponde con el segundo registro de este proceso en todo el mundo utilizando

la correlación cruzada de ruido sísmico.

Un análisis más detallado con la interpretación del mecanismo responsable de alterar la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, así como de su extensión horizontal y en profundidad es necesario para poder caracterizar de manera completa la observación compartida anteriormente. Además, es necesario buscar en las series de tiempo, otro tipo de evidencia sísmica como por ejemplo: tremor tectónico y sismos repetidos, que permitan confirmar la generación de los deslizamientos asísmicos propuestos en este trabajo. Dicho análisis escapa de los objetivos del presente boletín, pero se abordarán en un siguiente trabajo científico.

REFERENCIAS

- Bilek, S. L., Rotman, H. M. M., and Phillips, W. S. (2016). Low stress drop earthquakes in the rupture zone of the 1992 nicaragua tsunami earthquake. *Geophysical Research Letter*, 43(19):25–40.
- Campillo, M. and Paul, A. (2003). Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science*, 299(5606):547–549.
- Chaves, E. J. and Schwartz, S. Y. (2016). Monitoring transient changes within overpressured regions of subduction zones using ambient seismic noise. *Science Advances*, 2(1).
- Dixon, T. H., Jiang, Y., Malservisi, R., McCaffrey, R., Voss, N., Protti, M., and Gonzalez, V. (2014). Earthquake and tsunami forecasts: Relation of slow slip events to subsequent earthquake rupture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(48):17039–17044.
- Douglas, A., Beavan, J., Wallace, L., and Townend, J. (2005). Slow slip on the northern hikurangi subduction interface, new zealand. *Geophys. Res. Lett.*, 32(16).
- Dragert, H., Wang, K., and James, T. (2001). A silent slip event on the deeper cascadia subduction interface. *Geophys. Res. Lett.*, 29(5521):1525–1528.
- Harmon, N., Salas de la Cruz, M., Rychert, C., Abers, G., and Fischer, K. (2013). Crustal and mantle shear velocity structure of costa rica and nicaragua from ambient noise and teleseismic rayleigh wave tomography. *Geophysical Journal International*, 195(1300-1313).
- Kanamori, H. and kikuchi, M. (1993). The 1992 nicaragua earthquake: a slow tsunami earthquake associated with subducted sediments. *Letter to Nature*, 361(6414):714.
- Larson, K., Lowry, A., Kostoglodov, V., Hutton, W., Sánchez, O., Hudnut, K., and Suárez, G. (2004). Crustal deformation measurements in guerrero, mexico. *Journal of Geophysical Research*, 109(B4).
- Lobkis, O. I. and Weaver, R. L. (2001). On the emergence of the green's function in the correlations of a diffuse field. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(3011-3017).

- Obara, K., Hirose, H., Yamamizu, F., and Kasahara, K. (2004). Episodic slow slip events accompanied by non-volcanic tremors in southwest japan subduction zone. *Geophysical Research Letter*, 31(23).
- Ohta, Y., Freymueller, J. T., Hreinsdóttir, S., and Suito, H. (2006). A large slow slip event and the depth of the seismogenic zone in the south central alaska subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 247(1-2):108–116.
- Outerbridge, K. C., Dixon, T. H., Schwartz, S. Y., Walter, J. I., Protti, M., Gonzalez, V., Biggs, J., Thorwart, M., and Rabbel, W. (2010). A tremor and slip event on the cocos-caribbean subduction zone as measured by a global positioning system (gps) and seismic network on the nicoya peninsula, costa rica. *Journal of Geophysical Research*, 115(B10408).
- Rivet, D., Campillo, M., Radiguet, M., Zigone, D., Cruz-Atienza, V., Shapiro, N. M., Kostoglodov, V., Cotte, N., Cougoulat, G., Walpersdorf, A., and Daub, E. (2014). Seismic velocity changes, strain rate and non-volcanic tremors during the 2009–2010 slow slip event in guerrero, mexico. *Geophysical Journal International*, 196:447–460.
- Rivet, D., Campillo, M., Shapiro, N. M., Cruz-Atienza, V., Radiguet, M., Cotte, N., and Kostoglodov, V. (2011). Seismic evidence of nonlinear crustal deformation during a large slow slip event in mexico. *Geophysical Research Letter*, 38(L08308).
- Satake, K. (1994). Mechanism of the 1992 nicaragua tsunami earthquake. *Geophysical Research Letter*, 21(23):2519–2522.
- Schwartz, S. and Rokosky, J. (2007). Slow slip events and seismic tremor at circum-pacific subduction zones. *Reviews of Geophysics*, 45.
- Shapiro, N. M. and Campillo, M. (2004). Emergence of broadband rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. *Geophysics Research Letter*, 31(L07614).
- Shapiro, N. M., Campillo, M., Stehly, L., and Ritzwoller, M. H. (2005). High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307(5715):1615–1618.
- Snieder, R. (2004). Extracting the green's function from the correlation of coda waves: a derivation based on stationary phase. *Physical Review E*, 69(046610):1–8.
- Voss, N., Dixon, T. H., Malservisi, R., and Protti, M. (2017). Slow slip events in the early part of the earthquake cycle: Early earthquake cycle sses. *Journal of Geophysical Research*, 122(8).
- Xie, S., Dixon, T. H., Malservisi, R., Jiang, Y., Protti, M., and Muller, C. (2020). Slow slip and inter-transient locking on the nicoya megathrust in the late and early stages of an earthquake cycle. *Journal of Geophysical Research*, 125(11).

FELICES FIESTAS LES DESEA

