

# Sismotectónica en Costa Rica

## OVSICORI Universidad Nacional

OCTUBRE, 2021

**Resumen** — A partir del mes de octubre del 2021, el OVSICORI-UNA incorporó métodos de inteligencia artificial para la detección de eventos sísmicos. De esta forma, 4362 eventos fueron detectados mediante métodos computacionales modernos, en comparación con 1116 eventos localizados de manera manual por el personal del observatorio. El OVSICORI-UNA seguirá implementando ambas metodologías para la detección de eventos. En el mes de octubre, se registraron magnitudes momento sísmico entre 0,0 y 4,9. El sismo de mayor magnitud ocurrió el día 12, con epicentro ubicado a 29 km al sur de Jacó. De acuerdo con los reportes de la población realizados en las redes sociales del OVSICORI-UNA, 16 eventos de fueron sentidos. Las zonas sísmicamente más activas durante este mes, fueron el sector norte de la Península de Nicoya, Pacífico Central, Valle Central, y la Zona de Fractura de Panamá. Asimismo, el monitoreo continuo de GNSS (GPS) han permitido la observación de la deformación tanto en la Península de Nicoya, como en la Península de Osa. La utilización de los equipos de GPS permiten también la detección de sismos lentos.

**Palabras clave** — Inteligencia artificial, Sismos lentos, Nicoya, Pacífico Central.

**Abstract** — In October of 2021, OVSICORI-UNA applied modern Artificial Intelligence Algorithms for earthquake detection. For this reason, 4362 events were detected through modern computational methods, against 1116 events located manually by the personnel of the observatory. OVSICORI will continue with the implementation of both methods simultaneously for the localization of seismic events. For the month of October, the recorded seismic magnitude was between 0,0 and 4,9 Mw. The event with the highest magnitude occurred on the 12th, located 29 km South Jacó. According to the reports made by the citizens on the social networks of the observatory, 16 of these events were felt. The regions with the highest seismic activity were the North section of the Nicoya peninsula, Central Pacific, Central Valley, and the Panamá Fracture Zone. Also, the implementation of GNSS monitoring has allowed the recording of the deformation on the upper continental crust related with the subduction activity, along with the detection of Slow Earthquakes.

**Keywords** — Artificial Intelligence, Slow Earthquakes, Nicoya, Pacífico Central.

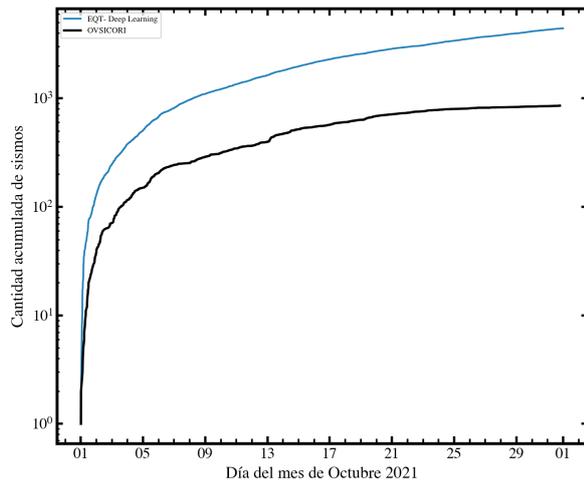
## SISMICIDAD EN COSTA RICA

La incorporación progresiva de métodos modernos de detección y localización de temblores, que incluyen el uso de redes neuronales profundas, en conjunto con la densificación instrumental y el crecimiento en poder y eficiencia de la infraestructura computacional moderna, están contribuyendo con la expansión sistemática del catálogo sísmico del OVSICORI-UNA como nunca antes se ha visto. De esta manera, en los próximos meses y años la población nacional e internacional verá un incremento significativo en la canti-

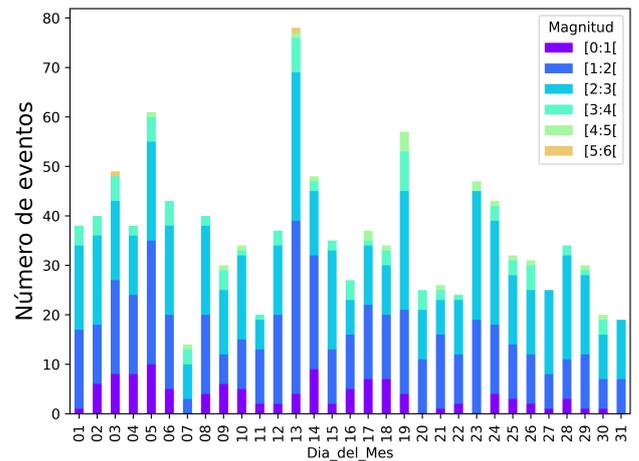
dad de sismos detectados por el Observatorio en el territorio costarricense.

El primero de estos avances utilizando estos métodos de computación, está muy bien representado durante el mes de octubre de 2021, debido a que la red sismográfica que el OVSICORI-UNA opera en Costa Rica detectó un total de 4362 sismos, mientras que manualmente fueron detectados por el personal del OVSICORI-UNA un total de 1116 sismos. La mayoría de estos eventos tienen una magnitud momento ( $M_w$ ) menor a 1,5.

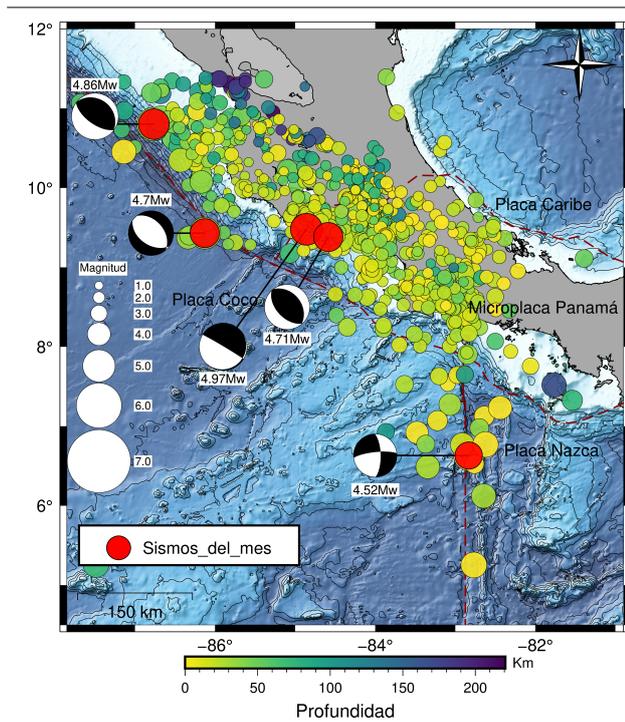
La figura 1 muestra la cantidad acumulada de sismos detectados por la red sismográfica del OVSICORI-UNA durante este mes. En esta, la curva de color negro representa la cantidad acumulada diaria de sismos que fueron detectados manualmente por el personal del OVSICORI-UNA, mien-



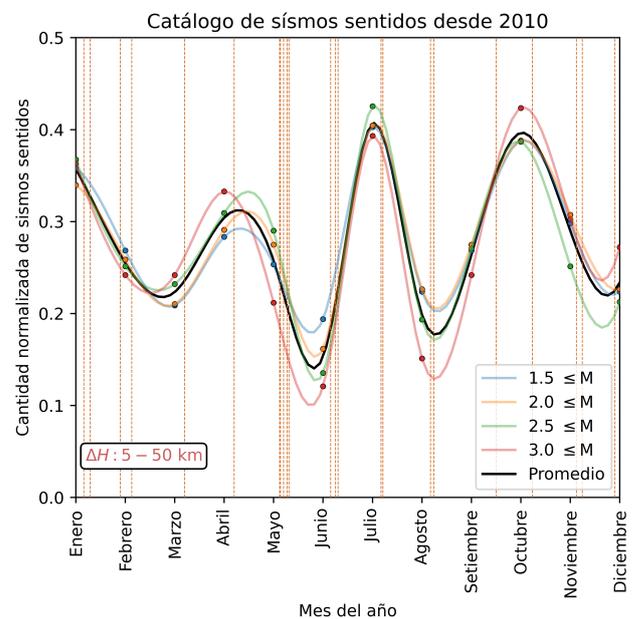
**Figura 1:** Cantidad acumulada de sismos detectados por el OVSICORI-UNA durante el mes de octubre de 2021. La curva de color negro corresponde con la cantidad de sismos que se detectaron manualmente por el personal del OVSICORI-UNA, mientras que en color azul, se muestra la cantidad de eventos detectados y picados por las redes neuronales profundas o bien, por algoritmos de aprendizaje automático de máquinas.



**Figura 3:** Conteo diario de sismos localizados manualmente por el OVSICORI-UNA



**Figura 2:** Mapa mostrando la distribución hipocentral de la sismicidad en Costa Rica durante el mes de Octubre 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 representan los sismos destacados del mes, cuya magnitud es mayor o igual a 4,5. Se muestra además el mecanismo de ruptura de estos eventos, el cual explica la cinemática de deslizamiento de las fallas causantes, junto con la distribución local y regional de esfuerzos tectónicos impuestos sobre Costa Rica debido a la interacción entre la Placa del Coco, la Placa de Nazca, la placa del Caribe y la microplaca de Panamá.

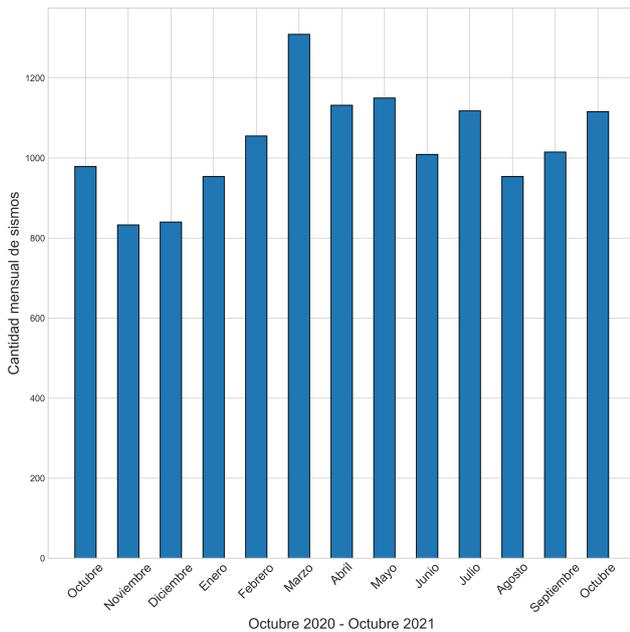


**Figura 4:** Conteo mensual de sismos sentidos en Costa Rica desde 2010 hasta el mes de Octubre de 2021.

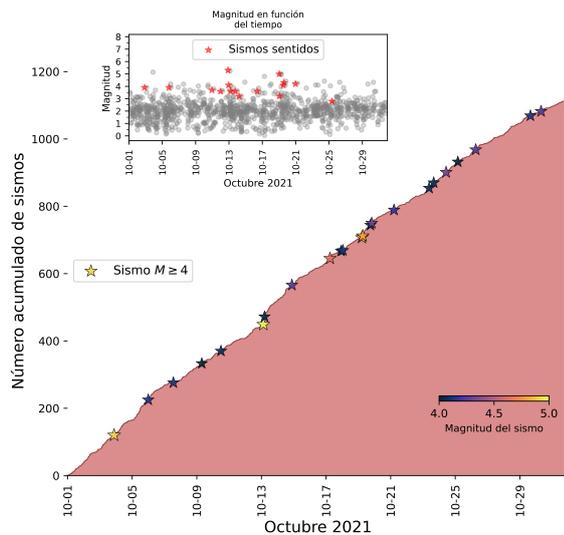
tras que la curva de color azul indica la cantidad de temblores que fueron detectados mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático de máquinas y, por lo tanto, sin

intervención humana. Hasta el momento, la cantidad de sismos detectados en el mes de octubre (utilizando métodos modernos de computación) cuadruplica el promedio mensual de eventos que han sido reportados por el Observatorio durante los últimos 9 meses.

La distribución hipocentral de la sismicidad del mes de octubre se puede observar en el mapa de la figura 2, donde el color y tamaño de los círculos corresponde con la profundidad y magnitud de los sismos, mientras que los mecanismos focales (o bien, las bolas de playa) representan el movimiento cinemático de las fallas que generaron los sismos de mayor magnitud durante este mes. La magnitud momento sísmico ( $M_w$ ) máxima fue de 4,9, mientras que la mínima registrada fue de 0,0. El sismo sentido de mayor magnitud,  $M_w = 4,9$ , ocurrió el día 12 a las 20:54, hora local (figura 2), cuyo hipocentro se localizó 29 km hacia el Sur de Jacó, a 21 km de profundidad. La fuente generadora de este sismo está rela-



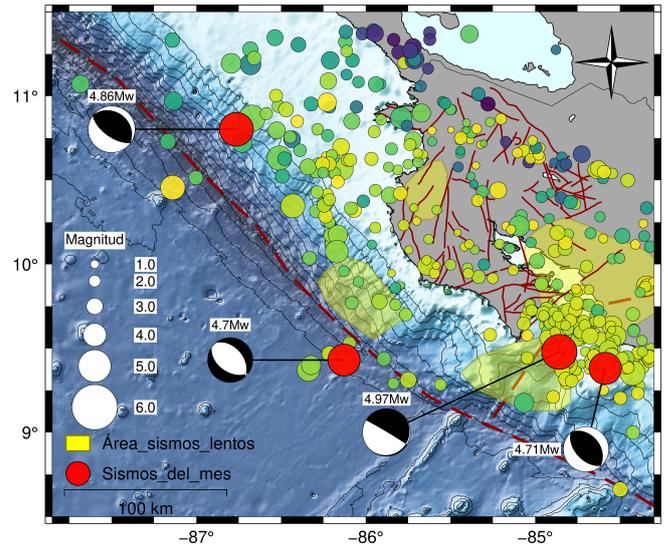
**Figura 5:** Cantidad mensual de sismos desde octubre del 2020 a octubre del 2021



**Figura 6:** Cantidad acumulada de sismos (curva de color rojo) localizados manualmente por el personal del OVSICORI-UNA durante el mes de Octubre de 2021. En la figura, las estrellas de color representan la ocurrencia de sismos con magnitudes mayores o iguales a 4,0, de acuerdo con la escala de colores que se observa en la parte inferior derecha. El panel superior muestra la distribución diaria de magnitudes correspondientes a la sismicidad del mes. En este, las estrellas de color rojo resaltan aquellos sismos que fueron sentidos por la población.

cionada con el proceso de subducción de la litosfera oceánica del Coco bajo la microplaca de Panamá. El día sísmicamente más activo fue el 13 de septiembre con un total de 78 eventos, mientras que el menos activo fue el día 07, con tan sólo 14 sismos (figura 3).

Del total de eventos localizados, 16 fueron reportados como sentidos por la población nacional a través de las redes sociales del Observatorio en Facebook y Twitter. El conteo mensual de sismos sentidos en Costa Rica desde el año 2010,



**Figura 7:** Sismos registrados durante el mes de octubre en la Península de Nicoya. Las líneas rojas representan las fallas activas de la zona (Denyer et al., 2013c,b). Los Mecanismos focales (bolas de playa) corresponden a los sismos más importantes del mes, mientras que las zonas en amarillo corresponden a las áreas acumuladas donde se han registrado sismos lentos (Voss et al., 2018).

se presenta en la figura 4. Los meses de junio y agosto representan los periodos del año donde se reportan o registran menos sismos sentidos, mientras que julio y octubre, por el contrario, tienden a ser (hasta el momento) los meses del año donde más se han percibido y reportado temblores en el país. 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>.

La cantidad total de sismos localizados manualmente durante el mes de octubre se muestra en la figura 5, donde se puede observar un aumento del 13,7% con respecto a la sismicidad registrada, por ejemplo, en el mes de agosto, mostrando también un comportamiento similar al observado en el mes de julio de 2021. En la figura 6 se puede observar un incremento en la cantidad de sismos relativamente constante, con un ligero incremento en la liberación del momento sísmico entre los días 13 y 15 de octubre, inmediatamente después a la ocurrencia del sismo de mayor magnitud,  $M_w = 4,97$ .

Durante el mes de octubre las regiones sísmicamente más activas fueron el Pacífico Central, específicamente frente a las costas de Jacó y Quepos, continuando hacia el Valle Central. También se generó una importante cantidad de sismicidad a lo largo del Golfo de Nicoya, frente a las costas de La Cruz y Conchal. Al igual que en meses anteriores, la Zona de Fractura de Panamá (ZFP) presentó una actividad sísmica importante como consecuencia de la interacción entre las placas de Coco y Nazca a lo largo del límite conservativo.

## SISMICIDAD EN LA PENÍNSULA DE NICOYA

**D**urante el mes de Octubre de 2021, una abundante can-

tividad de sismos ocurrieron en los extremos sureste y noroeste de la Península de Nicoya (figura 7), esencialmente a lo largo de la entrada del golfo de Nicoya y frente a las costas del golfo de Papagayo. Es a lo largo de estas dos regiones donde también ocurrieron los sismos más grandes del mes, con magnitud momento ( $M_w$ ) de 4,97 (el 13 de octubre) y 4,86 (el 3 de octubre), respectivamente. Esta región presenta características sismotectónicas muy particulares, y a continuación se tratará de resumir las principales observaciones hechas con respecto a la distribución espacial de la sismicidad y mecanismos focales, generados para los eventos importantes de esta región norte de la zona de subducción costarricense.

El basamento de la Península de Nicoya está compuesto en gran parte por basaltos masivos, provenientes del fondo oceánico, en lo que se conoce como el Complejo de Nicoya. Estos flujos de lava son las rocas más antiguas de Costa Rica, así como una de las más resistentes. Recubriendo a los basaltos, se encuentran depósitos de sedimentos marinos y continentales (Denyer et al., 2013a). Esta característica influye tanto en la deformación en superficie (formación de fallas), como en el comportamiento mecánico de las ondas sísmicas que viajan a través de este material.

Hacia la región norte de la Península, las fallas de rumbo tienen un movimiento principalmente dextral con una dirección aproximada de N-S (figura 7), lo cual coincide con la deformación cortical observada en las estaciones GNSS que el **OVVICORI-UNA** opera en la Península. Por el contrario, hacia el sector Sur-Sureste de la Península, las fallas tienen un comportamiento rotacional con movimiento principalmente sinistral. Tales cambios en el campo de esfuerzos y deformación de la corteza superior pueden estar relacionados con la subducción de la cordillera del Coco (Denyer 2013a y sus anomalías batimétricas asociadas).

Precisamente, la región sureste de la Península de Nicoya coincide con la transición lisa-rugosa del fondo oceánico (figura 7). Mientras que la región Noroeste de la Placa del Coco fue formada en la dorsal del Pacífico oriental, la región Sureste fue formada en la dorsal de Cocos-Nazca. Múltiples estudios han demostrado la existencia de diferencias laterales entre ambas secciones de la litósfera oceánica en edad, morfología, temperatura, reología, y otras propiedades mecánicas. Dichos cambios, en conjunto con una rápida tasa de convergencia, son los responsables de controlar la gran variedad de procesos geodinámicos que ocurren a lo largo de este margen compresivo y que incluyen: grandes terremotos, sismos de magnitud intermedia, microsismicidad, sismos lentos y tremor tectónico.

Los sismos lentos, en particular, son generados por el deslizamiento lento y asísmico (con una duración de horas, días o meses) de algunos segmentos de falla donde se reúnen las condiciones idóneas de temperatura, contenido de fluidos y reología del material. Este tipo de eventos no generan ondas sísmicas y por tanto no pueden ser percibidos en superficie, tal y como ocurre con los sismos con una ruptura dinámica.

En la Península de Nicoya, se han registrado sismos lentos cada 22 meses o menos en la parte sur, en el sector de la entrada del Golfo (específicamente entre Jacó y la Isla Chira),

así como frente a playa Garza, cerca de la trinchera Mesoamericana, y en la zona de El Coco-Brasilito (figura 7) (Voss et al., 2018). Comprender la interacción entre la ocurrencia de sismos lentos y los grandes terremotos es de suma importancia para ampliar nuestro conocimiento sobre la física de fallas y la generación de las grandes rupturas que típicamente generan daños abundantes en superficie.

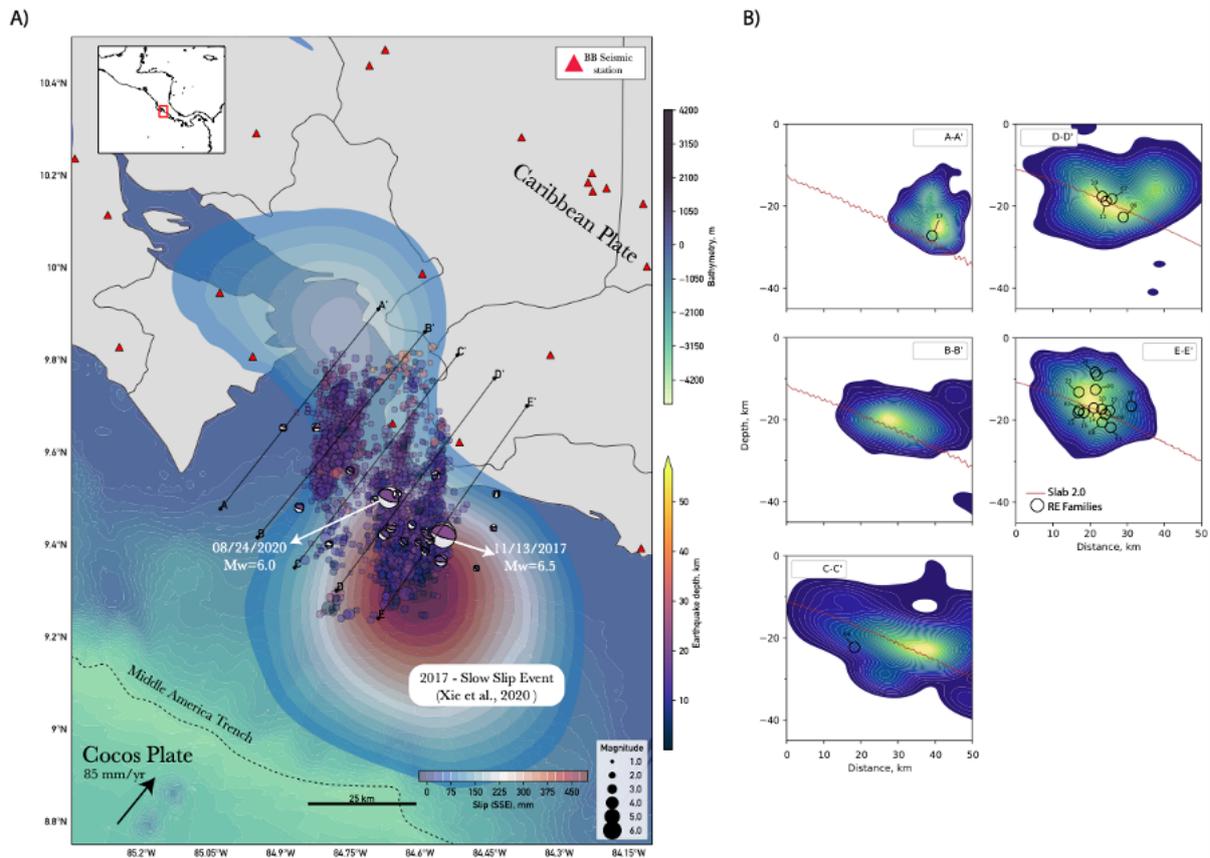
Durante el mes de Octubre, la mayor parte de la sismicidad generada a lo largo de la región Noroeste de la Península de Nicoya bordea las áreas que comúnmente hospedan la ocurrencia de sismos lentos, y existe además un notable gap (o ausencia) de sismicidad en la región entre la zona de Sámarra y Santa Teresa. Este tipo de comportamiento demuestra la existencia de fuertes cambios en las propiedades mecánicas y de fricción a lo largo de la interfaz, e influyen en la generación de sismos de gran importancia. Es por esto que, comprender la física de las fallas donde se generan estos eventos es absolutamente necesario para poder crear mejores planes sobre el potencial y riesgo ante posibles emergencias generadas por temblores y tsunamis en la zona.

## SISMICIDAD EN EL PACÍFICO CENTRAL

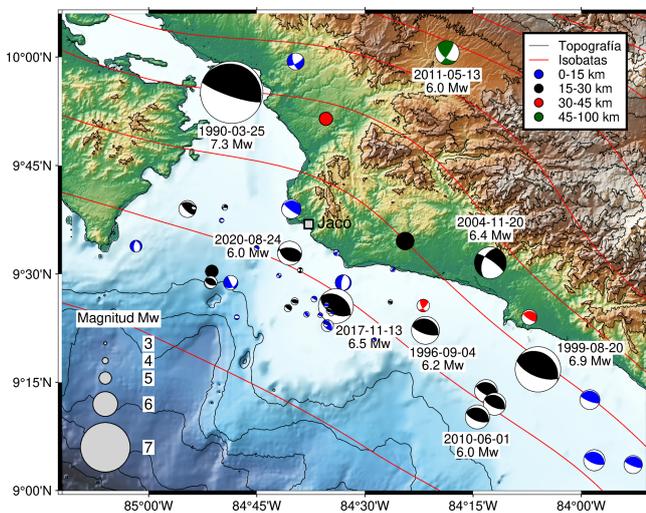
Continuando hacia el sur de la Península de Nicoya, en el segmento sismo-tectónico conocido como Cóbano-Herradura, la subducción continua de montañas y rugosidades submarinas modulan la actividad sísmica frente a las costas de Jacó, Esterillos y Quepos. Este tipo de anomalías batimétricas incluyen cambios reológicos y macrogeométricos importantes a lo largo de la falla que compone la zona de subducción. La sismicidad generada en esta región del país está sub-dividida en dos cúmulos principales que se ubican 1) en la entrada al golfo de Nicoya (C1), con profundidades que se extienden entre los 6 y 40 km, y 2) frente a Jacó y Esterillos (C2), con profundidades que van desde los 4 hasta los 30 km. Estos dos grandes grupos de sismicidad tienen una orientación Norte-Sur, casi perpendicular a la dirección de subducción de la placa del Coco (figura 8). La distribución en profundidad de ambos cúmulos es variada, extendiéndose desde el interior de la placa del Coco y el canal de subducción hasta las regiones más profundas de la microplaca de Panamá.

En general, el Pacífico Central costarricense representa la región sismo-tectónica más activa del país, generando de manera casi permanente una abundante microsismicidad y sismos de magnitud intermedia, tal y como se observa en la figura 2. Debido a la variabilidad geométrica y de fricción impuesta por la subducción de montañas submarinas y material poco consolidado y rico en fluidos, el segmento sísmico Cóbano-Herradura es también uno de los más productivos en cuanto a la generación de sismos lentos.

El cambio o transición en las propiedades de fricción a lo largo de la interfaz es evidente en el mapa de la figura 8, donde la sismicidad (sismos con ruptura dinámica) se encuentran encerrados o “ensanguchados” entre dos regiones principales que deslizan de manera asísmica (sin irradiar ondas sísmicas), denotadas por los contornos rojos y azules



**Figura 8:** Relocalización hipocentral de la actividad sísmica en el segmento Cóbano-Herradura desde Enero 2010 hasta Julio 2021.



**Figura 9:** Terremotos importantes en la región sismotectónica Cóbano-Herradura en los últimos 30 años. Se muestra el mecanismo focal de cada uno de estos eventos, junto con otros de menor magnitud que han ocurrido en la región. Las líneas de color rojo corresponden con la profundidad de la interfaz en función de la distancia, de acuerdo con el modelo Slab 1.0.

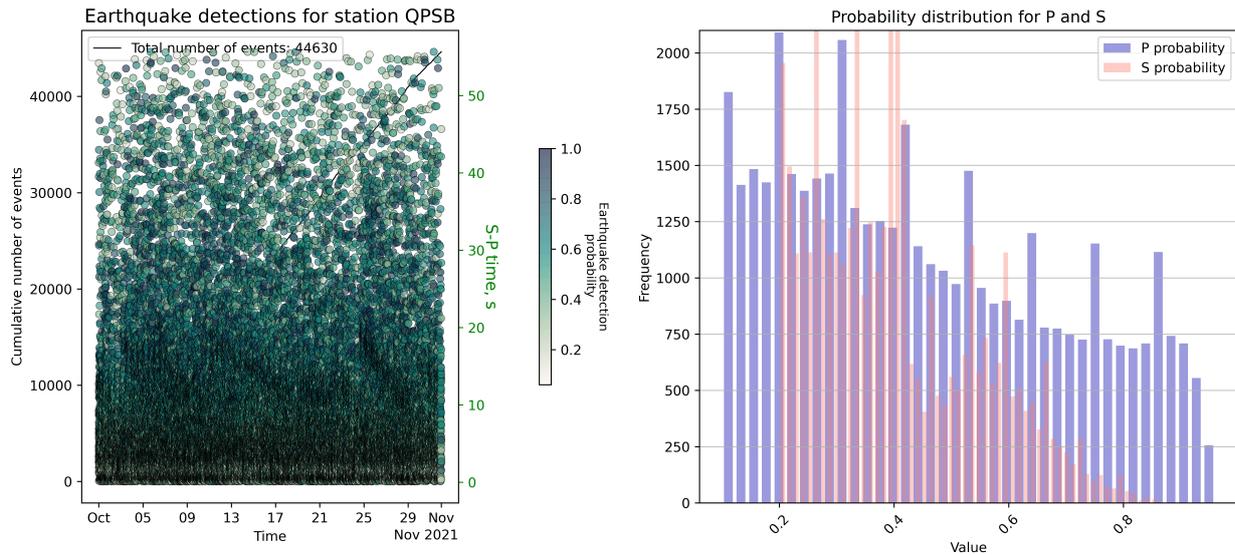
que rodean la actividad sísmica. Estas regiones de falla que deslizan muy lentamente en un estilo denominado “velocity-strengthening” están continuamente cargando las regiones de acoplamiento elástico de aquellos segmentos de falla que se encuentran acoplados, y es uno de los mecanismos principales encargados de disparar de manera estática la abundante microsismicidad en la zona.

Históricamente, en el segmento sísmico Quepos-Sierpe han ocurrido un número importante de terremotos con magnitud mayor o igual a 6,0 (figura 9), como por ejemplo, el terremoto de Cóbano del 25 de marzo de 1990, con magnitud  $M_w = 7,3$ , o bien, el terremoto de Damas del 20 de noviembre del 2004, con magnitud  $M_w = 6,4$ . Recientemente, el Pacífico Central fue sacudido por el sismo de Esterillos, con magnitud  $M_w = 6,5$ , ocurrido el 13 de Noviembre de 2017 y el sismo de Jacó, con magnitud  $M_w = 6,0$ , del 24 de agosto de 2020.

## DETECCIÓN DE SISMOS USANDO MACHINE LEARNING

En la última década, el OVSICORI-UNA ha ampliado notablemente la red sismográfica alrededor de toda Costa Rica, operando actualmente con un poco más de 90 estaciones sísmicas. Esto ha permitido mejorar la cobertura en todo el territorio nacional, permitiendo la detección de una mayor cantidad de sismos, los cuales hasta el mes de octubre de este año se han localizado de forma manual por el personal experto en localización sísmica del OVSICORI-UNA. El desarrollo de la tecnología, así como la incorporación progresiva de métodos modernos de detección y localización de temblores, en conjunto con la expansión instrumental, han permitido sistematizar la detección de sismos en la red del OVSICORI-UNA. Estos eventos suelen ser de magnitud menor a 1,5, lo cual implica que muchas veces escapan al ojo humano.

Por primera vez durante el mes de octubre del 2021 se uti-



**Figura 10:** Cantidad de sismos detectados mediante métodos modernos de detección y localización de temblores en la estación de Quepos (QPSB) en el pacífico central.

lizaron estos métodos en toda la red del **OVSICORI-UNA** cubriendo así todo el territorio nacional. En la figura 10 en el panel de la izquierda, se puede ver la cantidad total acumulada de eventos (44630) detectados durante este mes en la estación de Quepos (QPSB), cada círculo representa una detección y el color la probabilidad de que esa detección efectivamente sea un sismo. El panel de la derecha representa la distribución de probabilidad de las ondas P y S en función del número de eventos.

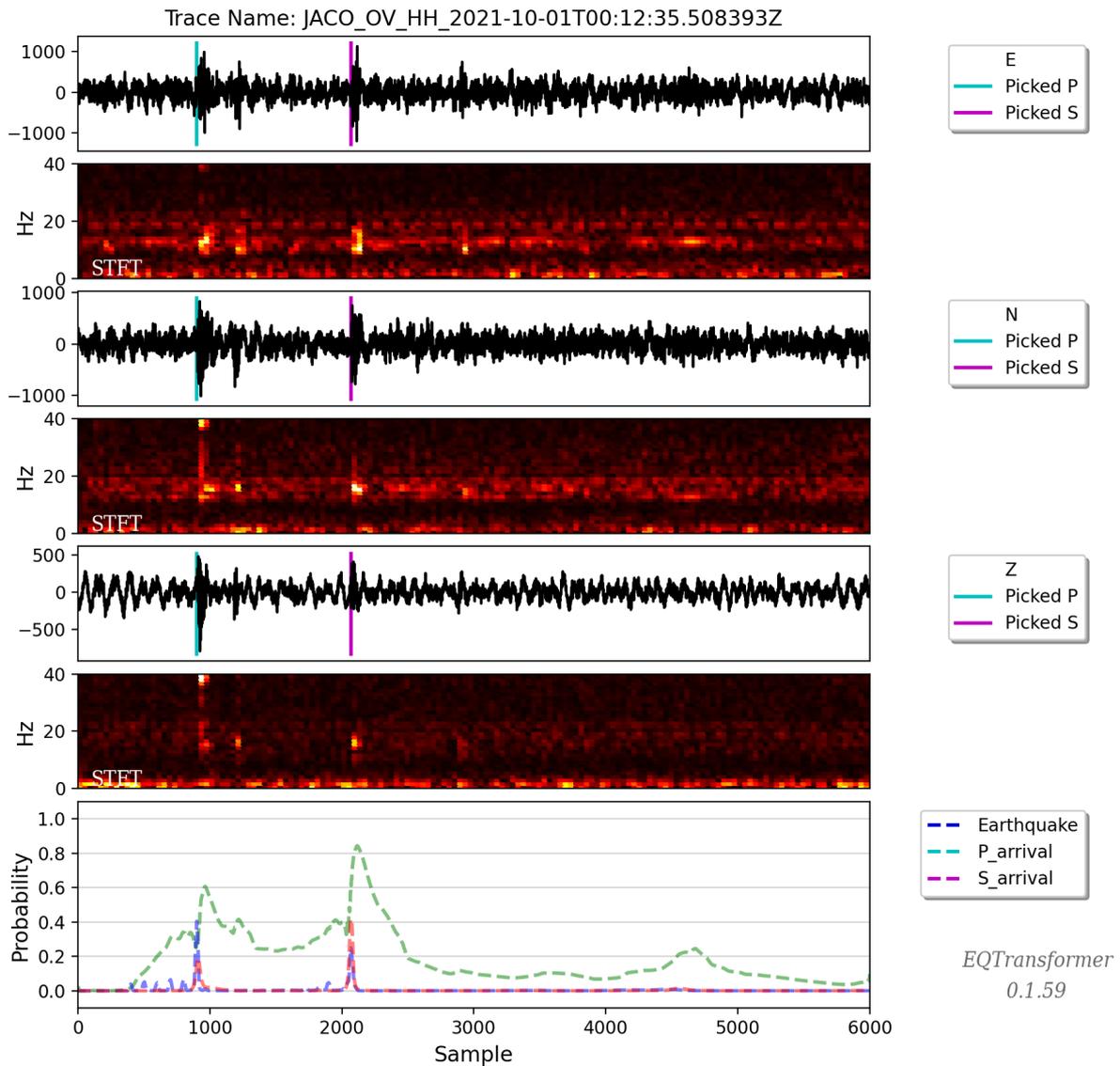
Para garantizar una buena calidad en los resultados obtenidos, se aplicaron tres restricciones a la detección sistematizada. La primera consiste en que la probabilidad de detección de que efectivamente sea un sismo debe ser superior al 70%, la segunda restricción es que cada detección debe estar asociada al menos a tres estaciones sísmicas de la red, y por último se utilizó como base mínima la el catálogo sísmico generado manualmente por los expertos en localización de sismos del **OVSICORI-UNA**.

En la figura 11 se puede observar un ejemplo del proceso de detección automática obtenida de un sismo de baja magnitud en la estación de JACO el día 10 de octubre a las 00:12:35 (UTC). Estos procesos de detección automática son muy importantes porque nos ayudan a cuantificar el total de energía liberada y caracterizar mejor las zonas sísmicamente activas a lo largo de toda Costa Rica.

## DEFORMACIÓN CORTICAL BASADA EN OBSERVACIÓN GNSS (GPS)

La red geodésica de receptores de GNSS detecta los movimientos de la corteza superficial y complementa la red sísmica. El **OVSICORI-UNA** calcula diariamente la posición de las estaciones GNSS del país, incluyendo la red del Instituto Geográfico Nacional y del AYA. La combinación de las posiciones diarias permite detectar los movimientos de la corteza con una precisión de algunos milímetros por año. Esta técnica complementa la red sísmica por su capacidad de detectar movimientos tectónicos con señal sísmicos muy bajos o al contrario con gran amplitud. Los eventos con señal sísmicos débiles son, por ejemplo, los sismos lentos de gran amplitud ( $M_i > 5,0$ ). Al lugar de liberar esta energía en cuestión de segundos como lo hacen los temblores tradicionales, los sismos lentos liberan la energía acumulada durante semanas hasta meses. La señal sísmica asociada a estos eventos son tremores que puede ser difícil detectar con estaciones sísmicas mientras que los GNSS detectan los movimientos centimétricos de estos tipo de evento. Durante los fuertes temblores ( $M_i > 5,0$ ), el GNSS y su capacidad de detectar oscilaciones del orden del centímetro hasta metros a alta frecuencia (hasta 50 Hz), permite registrar las ondas de superficie de los eventos y así complementar los datos registrados por la red sísmica.

Sin la ocurrencia de un sismo lento o de un temblor importante la pequeña magnitud de los movimientos tectónicos requieren el uso de serie de tiempo con un mínimo de 6 meses. Por esta razón los próximos resultados muestran la actividad tectónica entre mayo y finales de octubre de 2021.

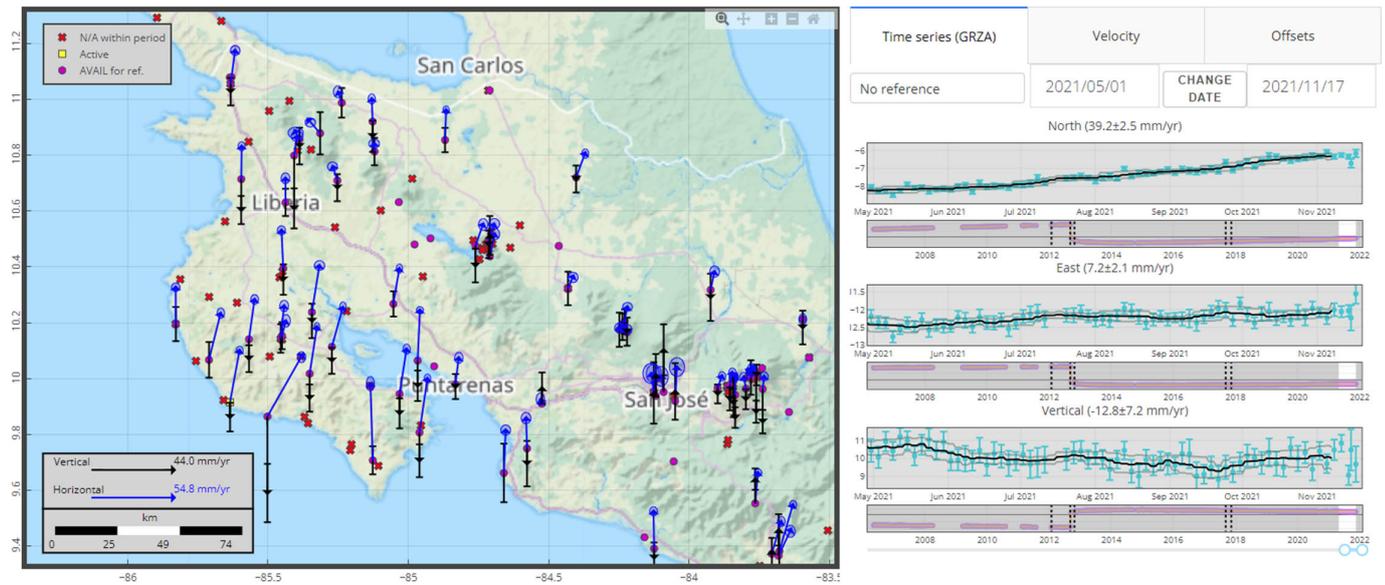


**Figura 11:** Ejemplo de detección automática de terremotos utilizando métodos modernos de detección de temblores en la estación de Jacó. En la figura se muestran las tres componentes del registro sísmico: Este-Oeste (E), Norte-Sur (N) y Vertical (Z). En cada subpanel se resalta la detección del arribo de la onda P (onda primaria) en color cian y la detección de la onda S (onda secundaria), acompañados además de un espectrograma que indica el rango de frecuencias radiadas cuyo color indica la intensidad de la energía radiada, donde, los colores más claros indican mayor intensidad en la señal.

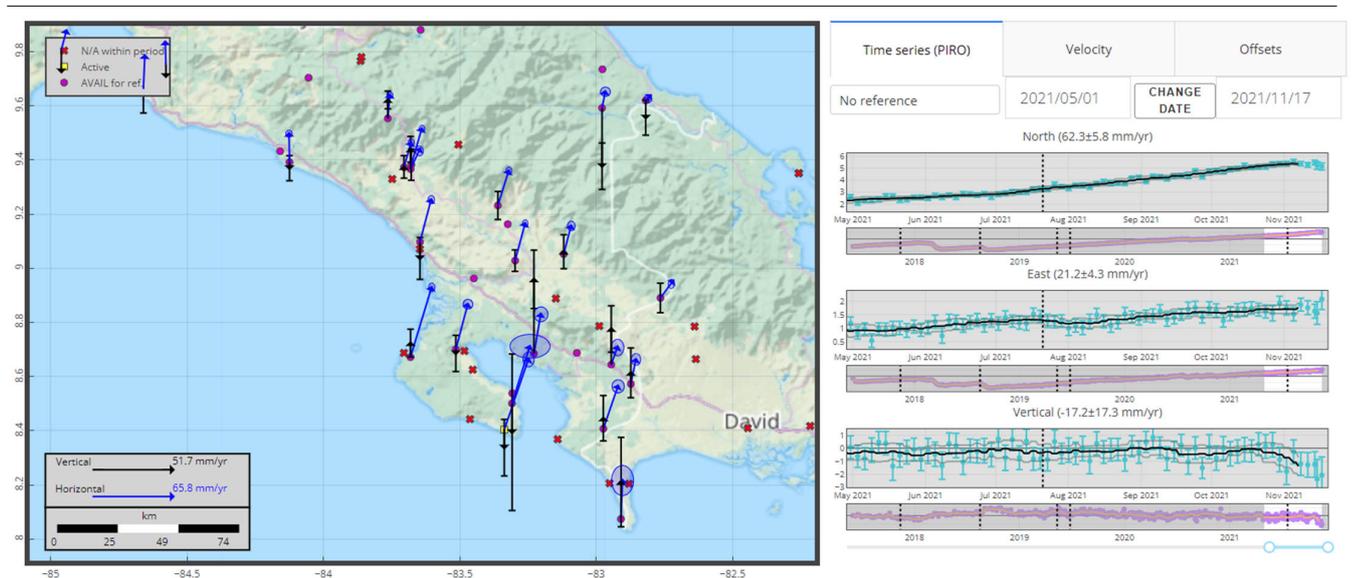
### *Pacífico Norte y Central*

En el Pacífico norte y la península de Nicoya, el movimiento dominante es la compresión generada por la subducción de la placa Coco (Figura 12). Aunque este movimiento es el patrón de deformación típico en el periodo inter-sísmico, estos últimos 6 meses se observa una compresión ligeramente mayor a la que se observó durante el periodo octubre 2020 hasta mayo 2021. En consecuencia, las velocidades de las estaciones al norte de Costa Rica (Norte de Liberia) giraron de unos 30 grados hacia el norte en comparación al periodo precedente. Este efecto se extiende de-

trás del arco volcánico donde las velocidades son mayores. Por ejemplo, en la estación Cope Vega la velocidad es el doble: 12 mm/año y 22 mm/año en el periodo precedente y este periodo respectivamente. En el Pacífico Central se observa también un aumento de unos 10 mm/año la velocidad hacia el norte a pesar del evento de magnitud  $M_w = 4,9$ .



**Figura 12:** Velocidades de la red GNSS en el norte de Costa Rica. Movimiento respecto a la placa caribe, modelo CARIB08 (Altamimi et al., 2012)



**Figura 13:** Velocidades de la red GNSS en el norte de Costa Rica. Movimiento respecto a la placa caribe, modelo CARIB08 (Altamimi et al., 2012)

**Pacífico Sur y Caribe**

La compresión por la subducción regresó a niveles normales respecto al periodo precedente (Figura 13). De hecho al final de 2020, se registró un desacople de la placa Caribe con la placa Coco que culminó en enero 2021 con un sismo lento de una amplitud de 6 centímetros a la punta de la península de Burica. Este evento tuvo como efecto de reducir la compresión por la subducción de las penínsulas de Osa y Burica. Por ejemplo, en la estación PIRO, al sur de la península de Osa, la velocidad norte era 15 mm/año menor durante el periodo octubre 2020 hasta mayo 2021 que en este periodo. En la estación de Caracol (CCOL), la disminución era de 27 mm/año.

En el valle de San Isidro del General y la costa Caribe, las velocidades entre este periodo y el precedente son parecidas.

**REFERENCIAS**

Altamimi, Z., Métivier, L., and Collilieux, X. (2012). Itrf2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7).

Denyer, P., Aguilar, T., and Montero, W. (2013a). Cartografía geológica de la península de nicoya, costa rica, estratigrafía y tectónica.universidad de costa rica. *Ministerio de Ambiente y Energía*.

Denyer, P., Aguilar, T., and Montero, W. (2013b). Mapa tectónico de la península de nicoya. universidad de costa rica - ministerio de ambiente y energía. *Ministerio de Ambiente y Energía*.

Denyer, P., Montero, W., and Alvarado, G. (2013c). Atlas

tectónico de costa rica 2ª edición. *Editorial Universidad de Costa Rica*.

Voss, N., Dixon, T. H., Liu, Z., Malservisi, R., Protti, M., and Schwartz, S. (2018). Do slow slip events trigger large and great megathrust earthquakes? *Science Advances*, 4(eaat8472).