

DEFORMACIÓN CORTICAL Y POTENCIAL SÍSMICO EN LA ZONA DE SUBDUCCIÓN DEL PERÚ

CONTRIBUCIÓN DE LA GEODESIA

Junio, 2020

Lima – Perú

Presidente Ejecutivo

Dr. Hernando Tavera

Director Científico

Dr. Danny Scipión

Director Sub-Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida

Ing. Juan Carlos Gómez

Elaborado por :

Dr. Juan Carlos Villegas-Lanza

Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo IV Etapa

Teléfono +51 1 317 23 00

Resumen Ejecutivo

El Programa de Investigación en Ciencias de la Tierra Sólida del Instituto Geofísico del Perú (IGP), tiene como una de sus líneas de investigación el estudio de la deformación de la corteza terrestre y la evaluación del potencial sísmico en el territorio Peruano. Esta actividad se basa principalmente en la medición de la posición precisa con instrumentos GNSS (Sistema de navegación global por satélite) de estaciones geodésicas permanentes y puntos de control ubicados en la superficie de la corteza terrestre del país, con la finalidad de cuantificar la velocidad de deformación de la corteza terrestre y elaborar modelos de acoplamiento sísmico que muestren las áreas de mayor potencial sísmico en el país. Durante la última década se han desarrollado varios proyectos de investigación que han permitido continuar con la implementación y densificación de la actual red de monitoreo geodésica para el estudio de la deformación de la corteza terrestre en el Perú. La información recolectada por esta red ha permitido, a la fecha, realizar varios estudios de investigación científica, cuyos resultados vienen contribuyendo con información científica a la identificación de las zonas de mayor potencial sísmico que sirven para el pronóstico de sismos de gran magnitud. Hoy en día, mediante el modelado de los desplazamientos geodésicos, se conoce por ejemplo que la superficie de contacto de placas tectónicas de Nazca y Sudamérica en la zona subducción del Perú, presenta complejas heterogeneidades: El segmento de la región norte, desde La Libertad hasta Tumbes, presenta áreas con bajos niveles de acumulación de energía sísmica, que podrían dar lugar a sismos de magnitud moderada ($M < 8$). En los segmentos de la región central, frente a Ancash, Lima e Ica, y la región sur, frente a Moquegua y Tacna, se evidencian áreas con altos niveles de acumulación de energía sísmica, que generarán sismos de gran magnitud en el futuro (desde $M 8.0$ hasta $M 8.8$ para la región central del Perú). En este informe se presenta una síntesis de los estudios geodésicos realizados durante los últimos años en el Perú. Esta información sirve de base para la generación de escenarios de desastres ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud, y para impulsar planes y políticas de prevención y reducción del riesgo por parte de los integrantes del SINAGERD. El compromiso del IGP con el país es continuar desarrollando estudios de investigación científica para la el monitoreo y evaluación continua de la deformación de la corteza terrestre y el potencial sísmico en el Perú.

ÍNDICE

1. Introducción	5
2. Contexto sismotectónico del Perú	6
2.1. Sismicidad	6
2.1.1. Sismicidad Histórica	6
2.1.2. Sismicidad Instrumental	8
3. El concepto del ciclo sísmico	10
3.1. Fase intersísmica	10
3.2. Fase cosísmica	10
3.3. Fase postsísmica	10
4. Generalidades del Sistema GNSS y su uso para el estudio de la deformación de la corteza terrestre	11
4.1. Sistema Global de Navegación por Satélite	11
4.2. Deformación de la corteza terrestre con datos geodésicos GNSS	12
5. Contribución de la geodesia en el estudio de la deformación cortical y el potencial sísmico en el Perú: Antecedentes	13
6. Deformación actual de la corteza terrestre en el Perú	15
7. Potencial sísmico en la zona de subducción del Perú	17
8. Valor Público de las investigaciones realizadas y su contribución a la toma de decisiones a favor de la población	20
9. Conclusiones	21
10. Referencias	22

1.0 Introducción

El territorio peruano se encuentra ubicado frente a una zona de subducción, en el denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, una región en la que a lo largo de la historia han ocurrido grandes terremotos y tsunamis que han causado cuantiosas pérdidas económicas y de vidas humanas. La continua dinámica de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, a una velocidad relativa de 6 cm/año, da lugar a una constante fricción su interfaz de contacto que resulta en procesos de acumulación y liberación de energía, lo que produce los grandes terremotos (Tavera y Bernal 2005; Villegas-Lanza et al 2014, 2016). La historia sísmica de esta zona de subducción, muestra que los terremotos son cíclicos, tanto en el espacio como en el tiempo (Dorbath, et al 1991).

En las últimas dos décadas los instrumentos y herramientas de geodesia espacial, en particular el Sistema Global de Posicionamiento por Satélite (GNSS), han contribuido a mejorar el conocimiento y comprensión de los diferentes procesos geofísicos asociados al ciclo sísmico, en sus distintas fases; antes, durante y después de los terremotos. Las mediciones geodésicas GNSS permiten hoy en día cuantificar el desplazamiento de un punto sobre la superficie de la Tierra con un nivel de precisión por debajo de un milímetro. Esta información es útil para monitorear la velocidad y características de la deformación de la corteza terrestre, y a partir de ella, modelar los desplazamientos para determinar las propiedades friccionales de la interfaz de contacto de placas e identificar las áreas de mayor potencial sísmico.

Durante los últimos diez años el Instituto Geofísico del Perú (IGP) viene llevando a cabo proyectos de investigación orientados a estudiar la deformación de la corteza terrestre e identificar el potencial sísmico en la principal fuente generadora de grandes terremotos, la zona de subducción. Algunos de estos proyectos se han realizado en cooperación con centros de investigación del exterior, y otros, con recursos nacionales a través de fondos concursables (FONDECYT e INNOVATE). Estos proyectos, en general, han permitido implementar y densificar la red de monitoreo geodésica para el estudio de la deformación de la corteza terrestre, la cual, está compuesta por algunas estaciones GNSS permanentes y varios puntos de control en los que se realizan mediciones interanuales. La información recolectada de esta red ha servido para realizar varios estudios de investigación, con importantes resultados que han permitido, por ejemplo, identificar las zonas de mayor potencial sísmico y generar pronósticos de grandes terremotos en la costa peruana.

En este informe se presenta una síntesis de los resultados más importantes del monitoreo geodésico con GNSS realizados por el IGP en los últimos años. Se inicia presentando brevemente las características del contexto sismotectónico del Perú, generalidades del concepto del ciclo sísmico, la red geodésica de deformación de la corteza y los datos GNSS recolectados, y finalmente los resultados obtenidos. Por último, se resalta la inversión efectuada por el Estado, y los productos obtenidos con valor público que contribuyen a la toma de decisiones en favor de la población.

2.0 Contexto sismotectónico del Perú

El territorio Peruano se encuentra ubicado frente a una zona de convergencia de placas tectónicas, conocida como “zona de subducción peruana”, donde la placa oceánica de Nazca se introduce por debajo de la placa continental Sudamericana a una velocidad relativa de 6 a 7 cm/año (Norabuena et al., 1998; Kendrick et al., 2003) a lo largo de más de 2000 km desde la latitud 3°S hasta 18°S. Esta zona de subducción es una de las regiones sísmicas más activas de la Tierra, en ella han ocurrido grandes terremotos de magnitud superior a 8.0 Mw, que han generado tsunamis devastadores (<http://earthquake.usgs.gov/>). Este proceso geodinámico ocasiona la compresión, deformación y levantamiento del margen continental, dando lugar a la formación de las estructuras tectónicas y geomorfológicas tales como la fosa oceánica, la Cadena Andina, la Cadena Volcánica, sistemas de fallas y unidades geomorfológicas. La zona de subducción Peruana se divide en 3 regiones o segmentos, en función a su geometría, ángulo de subducción, y características geomorfológicas, estas son: 1) la región norte, comprendida desde Tumbes hasta la fractura de Mendaña; 2) la región centro delimitada por la fractura de Mendaña y la dorsal de Nazca; y 3) la región sur, desde la dorsal de Nazca hasta el codo de Arica (actual frontera Perú-Chile) (Figura 1).

2.1 Sismicidad

2.1.1 Sismicidad Histórica

La historia sísmica del Perú data desde la época de la conquista en el siglo XVI. Gran parte de esta información ha sido recolectada a través de crónicas, narraciones y documentos religiosos, recopiladas y publicadas por diferentes autores (Polo, 1904; Barriga, 1939; Silgado, 1978; Dorbath et al., 1990; Seiner, 2009). Se sabe hoy en día que la región central del Perú frente a las costas de Lima sufrió un gran terremoto de magnitud 8.8 Mw en 1746, y en la región sur de Perú dos grandes terremotos en los años de 1604 (8.4 Mw) y 1868 (8.6 Mw), todos acompañados de tsunamis. Basado en el tiempo de retorno de grandes eventos algunos autores han propuesto periodos de recurrencia de 150 a 200 años (Dorbath et al., 1990; Tavera et al., 2005). El segmento norte, por el contrario, se caracteriza por la ausencia de terremotos de gran magnitud ($M_w > 8.0$) (Silgado, 1978; Seiner, 2009), no obstante se han registrado eventos de magnitud moderada que parecen ser característicos de esta región, como los ocurridos en Piura 1960 (7.6 Mw) y Chimbote 1996 (7.5 Mw), que produjeron tsunamis locales (Villegas-Lanza, 2014) (Figura 1). Por otro lado, en el interior del continente también ocurren sismos de magnitud moderada ($M < 7.0$), que son producto de la interacción de las fallas corticales, y que al ocurrir cerca de la superficie (< 30 km) a veces suelen ser perjudiciales.

2.1.2 Sismicidad Instrumental

El registro de la sismicidad instrumental en el Perú se inicia con la instalación de la Red Sísmica Mundial (World Wide Seismological Standard Network) en el año 1960. Desde esa fecha se viene obteniendo información sísmica de los parámetros hipocentrales de un sismo. Asimismo, el IGP ha venido gradualmente incrementado el número de estaciones sísmicas para monitorear la actividad sísmica nacional y hoy cuenta con una robusta Red Sísmica Nacional. La información de los parámetros hipocentrales ha permitido a los investigadores realizar diferentes análisis y evaluaciones de la sismicidad, en base a los cuales se ha evidenciado que el Perú presenta una alta tasa de sismicidad superficial, intermedia y profunda (Figura 2). La distribución espacial de los sismos ha permitido identificar varias fuentes sismogénicas:

- a) Sismos de foco superficial ($h \leq 60$ km): tienen su origen principalmente en la interfaz de subducción de las placas de Nazca y Sudamericana, concentrándose en mayor número entre la fosa y la línea de costa. En el interior del continente también se origina sismicidad superficial aunque en menor proporción, siendo originada por la interacción de las fallas corticales activas.
- b) Sismos de foco intermedio ($60 \text{ km} < h \leq 300$ km): su origen está asociado a la deformación interna de la placa de Nazca, con recurrencia en la línea de costa y al interior del continente. Se agrupan en tres fuentes, la primera ubicada por debajo de los 9°S y paralela a la línea de costa, la segunda en la zona Subandina de la región norte y la tercera en la región sur.
- c) Sismos de foco profundo ($300 \text{ km} < h \leq 700$ km): son eventos que están asociados a la deformación interna de la placa de Nazca y su interacción con el manto. Su ubicación epicentral se alinea aproximadamente con los límites fronterizos de Perú-Brasil y Perú-Bolivia.

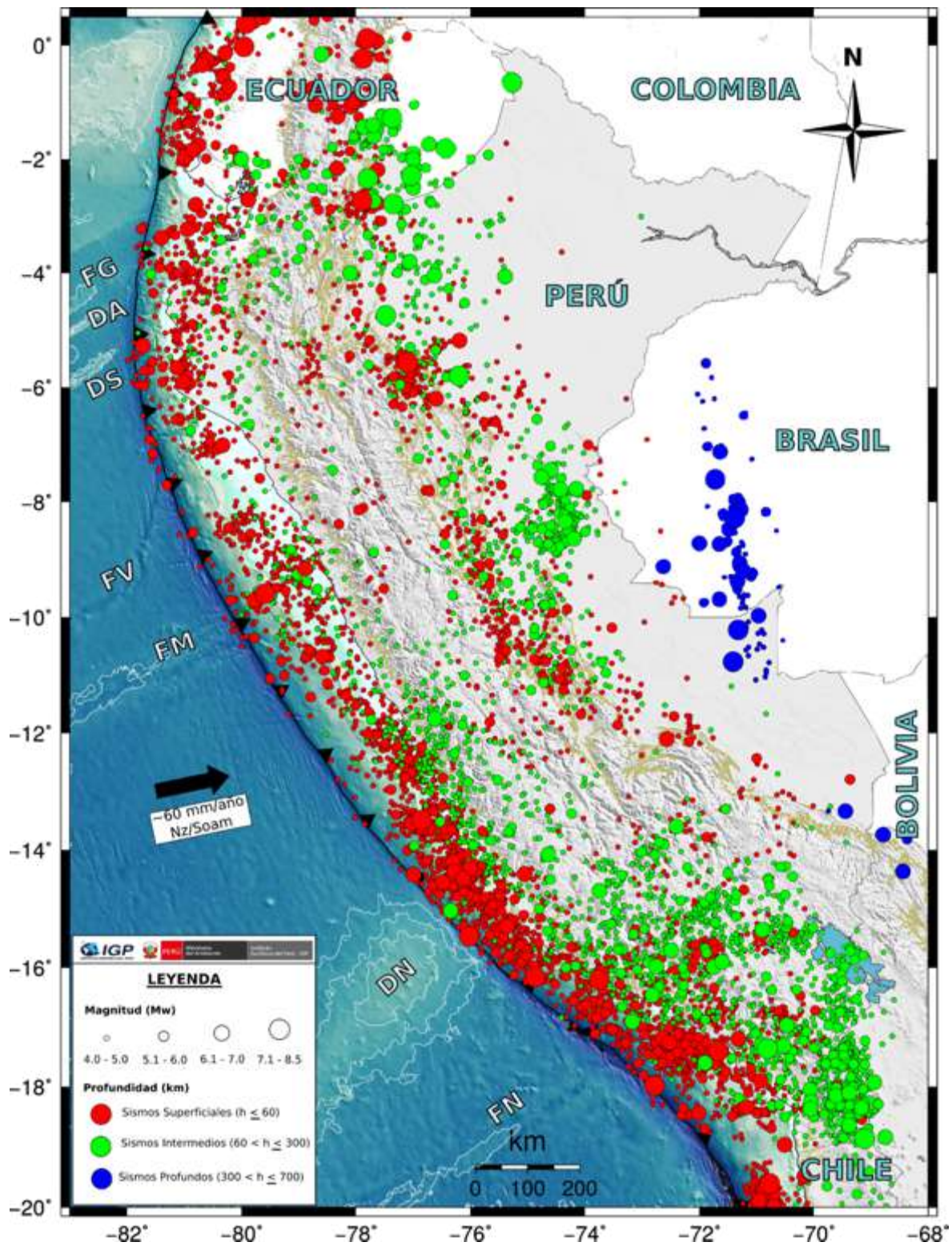


Figura 2. Sismicidad Instrumental del territorio peruano, periodo 1960-2018. Imagen de Mantilla (2018)

3.0 El concepto del ciclo sísmico

Este concepto se define como el conjunto de procesos que ocurren durante la acumulación y liberación de esfuerzos en las zonas de contacto de placas tectónicas y/o fallas activas. Este término fue inicialmente propuesto por Reid (1910), quien sustentó las bases de la Teoría del rebote elástico, la cual se caracteriza por la liberación repentina de energía sísmica acumulada durante un largo periodo de tiempo (años, décadas o siglos). El ciclo sísmico está constituido por 3 fases principales que se repiten de manera sistemática entre un sismo y otro de similares características:

3.1 Fase Intersísmica

Los grandes terremotos de subducción se originan en la interfaz de contacto de placas. Los avances logrados por la sismología y la geodesia permiten caracterizar esta zona como un conjunto de áreas o asperezas distribuidas de manera heterogénea, las cuales impiden la 'normal' convergencia de placas, ocasionando el bloqueo mecánico, acumulación de esfuerzos y deformación elástica en la placa superior con periodos de tiempo de decenas a varios cientos de años (Figura 3).

3.2 Fase cosísmica:

Cuando los esfuerzos acumulados durante la fase anterior sobrepasan cierto umbral, se liberan súbitamente dando lugar a un sismo, el cual dependiendo de su tamaño, puede durar desde algunos segundos a minutos (Figura 3).

3.3 Fase Postsísmica

Luego de finalizada la ruptura sísmica sigue un periodo de estabilización caracterizado por la ocurrencia de réplicas y deslizamiento asísmico que se suman a la respuesta viscoelástica de la parte inferior de la litósfera. Esta diversidad de procesos puede durar desde algunos meses a varias decenas de años dependiendo del tamaño y extensión de la ruptura sísmica (Figura 3).



Figura 3. Esquema representativo del ciclo sísmico, donde se muestra los procesos de acumulación y relajación de esfuerzos en las fases principales: fase intersísmica, fase cosísmica y fase postsísmica. Modificado de www.tectonics.caltech.edu/.

4.0 Generalidades del Sistema GNSS y su uso para el estudio de la deformación de la corteza terrestre

En las últimas décadas las técnicas de geodesia espacial han contribuido a un mejor conocimiento y comprensión de los procesos físicos asociados a la generación de grandes terremotos. Hoy en día la comunidad científica, en particular los geocientíficos, utilizan herramientas como el GPS para detectar y cuantificar con un alto nivel de precisión (1 mm), cualquier cambio de posición de un punto sobre la superficie de la Tierra y así estudiar cada una de las fases del ciclo sísmico. Para el estudio y monitoreo de puntos geodésicos se utilizan dos tipos de mediciones: 1) mediciones temporales o de campaña, es decir se instalan monumentos geodésicos que son medidos con instrumentos GPS cada 1 o 2 años durante sesiones de registro de por lo menos 48 horas, y 2) mediciones continuas o permanentes, para lo cual se establecen redes geodésicas compuestas por estaciones de monitoreo continuo con tasas de registro de 30 a 1 segundo o menos. Esta información resulta de mucha utilidad para cuantificar los desplazamientos e identificar las áreas de mayor deformación asociada a la acumulación de energía sísmica, permitiendo identificar las áreas de mayor potencial sísmico en donde ocurrirán los próximos terremotos de gran magnitud.

4.1 Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)

The Global Navigation Satellite System (GNSS), por sus siglas en inglés, es un conjunto de sistemas que proporcionan la posición relativa de un objeto en la superficie terrestre (latitud, longitud y altura) con un alto nivel de precisión. Este sistema está basado en el principio de triangulación o trilateración satelital, este

principio se basa en medir el tiempo de recorrido de una onda electromagnética entre un satélite y el receptor. Si se conoce la posición de un satélite, la fecha y hora exacta a la cual una señal fue emitida y recibida, entonces se puede deducir que se sitúa sobre una esfera centrada sobre el satélite de radio $c \cdot \Delta t$, donde c es la velocidad de propagación de la onda electromagnética ($c \sim 300,000$ km/s) y t es el tiempo de propagación de la onda entre el satélite y el receptor. Con la señal de 3 satélites se puede determinar la posición de un receptor, siendo esta la intersección de las 3 esferas centradas sobre los satélites.

4.2 Deformación de la corteza terrestre con datos geodésicos GNSS

Una red geodésica es un conjunto de estaciones y/o puntos distribuidos sobre la superficie terrestre de una determinada región, ubicados estratégicamente en lugares que reúnen condiciones de seguridad y permanencia además de tener un horizonte libre de obstrucciones, sobre los cuales se realizan mediciones permanentes y/o temporales. Las redes geodésicas constituyen los cimientos sobre los que se apoyan multitud de disciplinas tanto científicas como técnicas y son imprescindibles para el estudio teórico de la forma y figura de la Tierra.

Una estación GNSS está conformada por: a) una antena, que se encarga de recibir y amplificar la señal GPS para enviarla con suficiente potencia al receptor a través de un cable de conexión, formando una sola unidad, b) un receptor, en donde se almacena la señal de los satélites recogida por la antena, c) una unidad de almacenamiento, d) un algoritmo para el procesamiento de la información transmitida y por último e) elementos auxiliares como cables de conexión, trípode, regla, base nivelantes, brújula, marcadores de acero, placas de cobre o bronce, entre otros (Figura 4). Las estaciones geodésicas y/o puntos de control temporal pueden ser: i) permanentes de operación continua, y ii) temporales o de campaña (SGPS) con mediciones esporádicas que varían dependiendo el fin de la investigación.



Figura 4. Estaciones GNSS de monitoreo permanente (izquierda, fotografía de UNAVCO) y de campaña (derecha) fotografía de la estación SAMC en el departamento de Ancash).

5.0 Contribución de la geodesia para el estudio de la deformación cortical y el potencial sísmico en el Perú: Antecedentes

Las primeras mediciones con GPS en el Perú fueron realizadas en el año 1994 en el marco del proyecto SNAPP, en los Andes Centrales (Norabuena et al., 1998). En dicho estudio los autores utilizaron mediciones geodésicas en las regiones centro y sur de Perú y el noroeste de Bolivia, con las cuales determinaron que la deformación cortical observada responde al acoplamiento sísmico en la interfaz de las placas Nazca/Sudamérica y a la deformación permanente que da lugar al levantamiento de la cordillera andina. Luego Bevis et al., (2001) reúne nuevas mediciones en la el sector de Chile y Bolivia y basados en modelos de dislocación elástica determinó que la profundidad de bloqueo mecánico en la interfaz de subducción es de 10 a 50 km. Posteriormente Gagnon et al., (2005), realizaron uno de los primeros estudios de geodesia acústica submarina en el mundo, combinando mediciones geodésicas del fondo marino y de la superficie terrestre en la región central del Perú. Dichos autores lograron estimar un fuerte acoplamiento sísmico comprendido entre los 2 y 40 kilómetros de profundidad a partir de la fosa marina frente al departamento de Lima. Posteriormente, Chlieh et al., (2011) recopilaron data geodésica reportada en los estudios anteriores y mediante la inversión de velocidades GPS estimaron el acoplamiento intersísmico en la zona de subducción de los Andes Centrales. En sus resultados sugieren la existencia de áreas que experimentan un alto y heterogéneo acoplamiento intersísmico.

Hasta el año 2014 no se tenía información integral sobre el estado de acumulación de esfuerzos ni el potencial sísmico de la zona de subducción de las regiones norte y centro del Perú. Hasta ese entonces los estudios de deformación cortical se centraron principalmente en la región sur y parte de la región central. Para la región norte se creía que ésta podría generar grandes sismos al igual que en el centro y el sur, sin embargo, no se tenía registro instrumental ni histórico de grandes sismos, lo que generaba gran incertidumbre.

Desde el año 2008 en adelante se iniciaron diversos proyectos de investigación enfocados en estudiar la zona de subducción de las regiones norte, centro y sur del Perú. Desde entonces a la fecha se ha venido instalado nuevas estaciones GNSS permanentes y realizando mediciones geodésicas interanuales en muchos puntos de control, lo cual ha servido para implementar y fortalecer la actual red monitoreo geodésico para el estudio de la deformación cortical y el potencial sísmico en el país. Actualmente la red está compuesta por más de 30 estaciones GNSS permanentes y más de 200 puntos de control temporales (Figura 5). Algunas de estas iniciativas han sido desarrolladas como parte de proyectos de cooperación con centros de investigación del exterior (IRD, Geoazur, ISTERre, Caltech) y muchas otras con recursos nacionales a través de programas presupuestales y de proyectos de investigación con fondos concursables (PP068, FONDECYT, INNÓVATE. En todos los casos el fin primario ha sido y es medir el desplazamiento de la corteza terrestre.

Para ello es importante asegurar que la instalación de los instrumentos de medición sea apropiada, es decir, que los emplazamientos sean en el mejor de los casos afloramientos rocosos y formaciones geológicas estables, que reflejen el real desplazamiento de la corteza terrestre. Asimismo, para las mediciones de los puntos de control temporal se ha asegurado que el tiempo de medición sea de por lo menos 72 horas continuas, a fin de garantizar resultados fiables del cálculo diario de las coordenadas medidas.

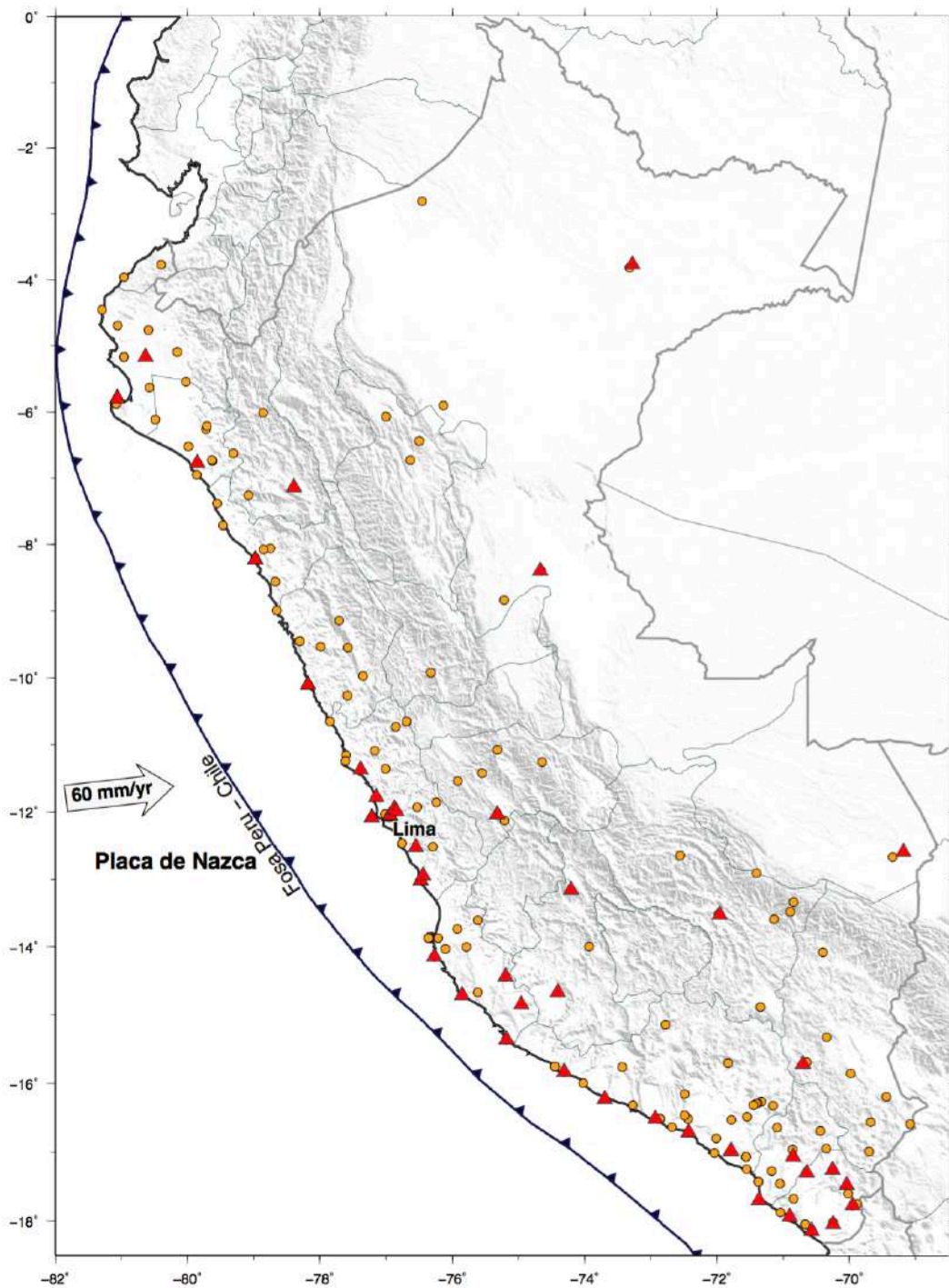


Figura 5. Red geodésica para el monitoreo de la deformación cortical y el potencial sísmico del Perú. Los triángulos representan la ubicación de las estaciones permanentes y los círculos la ubicación de los puntos de control temporal.

Actualmente la red está compuesta por más de 30 estaciones GNSS permanentes y más de 200 puntos de control temporales (Figura 5). Algunas de estas iniciativas han sido desarrolladas como parte de proyectos de cooperación con centros de investigación del exterior (IRD, Geoazur, ISTERre, Caltech) y muchas otras con recursos nacionales a través de programas presupuestales y de proyectos de investigación con fondos concursables (PP068, FONDECYT, INNÓVATE. En todos los casos el fin primario ha sido y es medir el desplazamiento de la corteza terrestre. Para ello es importante asegurar que la instalación de los instrumentos de medición sea apropiada, es decir, que los emplazamientos sean en el mejor de los casos afloramientos rocosos y formaciones geológicas estables, que reflejen el real desplazamiento de la corteza terrestre. Asimismo, para las mediciones de los puntos de control temporal se ha asegurado que el tiempo de medición sea de por lo menos 72 horas continuas, a fin de garantizar resultados fiables del cálculo diario de las coordenadas medidas.

6.0 Deformación actual de la corteza terrestre en el Perú

Los resultados de los estudios realizados muestran que la deformación cortical en el Perú es heterogénea y responde principalmente a la contribución de dos factores: (1) fuerte deformación inducida por el proceso de convergencia de la placa de Nazca bajo la sudamericana, en respuesta a la fricción que se produce en la interfaz de contacto de placas, y (2) lenta deformación tectónica de largo plazo inducida por la dinámica interna de la placa sudamericana, la presencia de un bloques tectónicos y el acortamiento cortical zona subandina. En el estudio publicado por Nocquet et al., (2014) para las regiones centro y norte del Perú, se puso en evidencia por primera vez la existencia de un bloque tectónico en el norte de Perú, al cual se le denominó “Sliver Inca”, cuya dinámica presenta un desplazamiento de 5 mm/año en dirección SurEste prolongándose hasta el sur del Perú. Posteriormente, el estudio de Villegas-Lanza et al., (2016), con mayor cobertura espacial y temporal de datos, define las fronteras del bloque tectónico, como el segmento del antearco que comprende la estructura desde la fosa marina hasta la cordillera occidental, extendiéndose desde el Golfo de Guayaquil hasta el Altiplano en el sur del Perú. Asimismo, en este estudio se define que la cordillera oriental y la zona subandina presentan tasas de acortamiento tectónico del orden de 2 a 4 mm/año, constituyendo un dominio de intensa actividad tectónica en el presente. Recientemente, estudios adicionales enfocados en las regiones sur, centro y norte de Perú y en el Gap Sísmico de Nazca (Quiroz 2016, Quiroz y Villegas 2018, Villegas-Lanza et al 2019, 2020) han permitido adquirir más datos geodésicos de deformación cortical. Dichos estudios definen mejor la variación lateral de la deformación a lo largo de la fosa y reafirman que la principal fuente de deformación superficial de la corteza terrestre es originada por el proceso de fricción de las placas tectónicas.

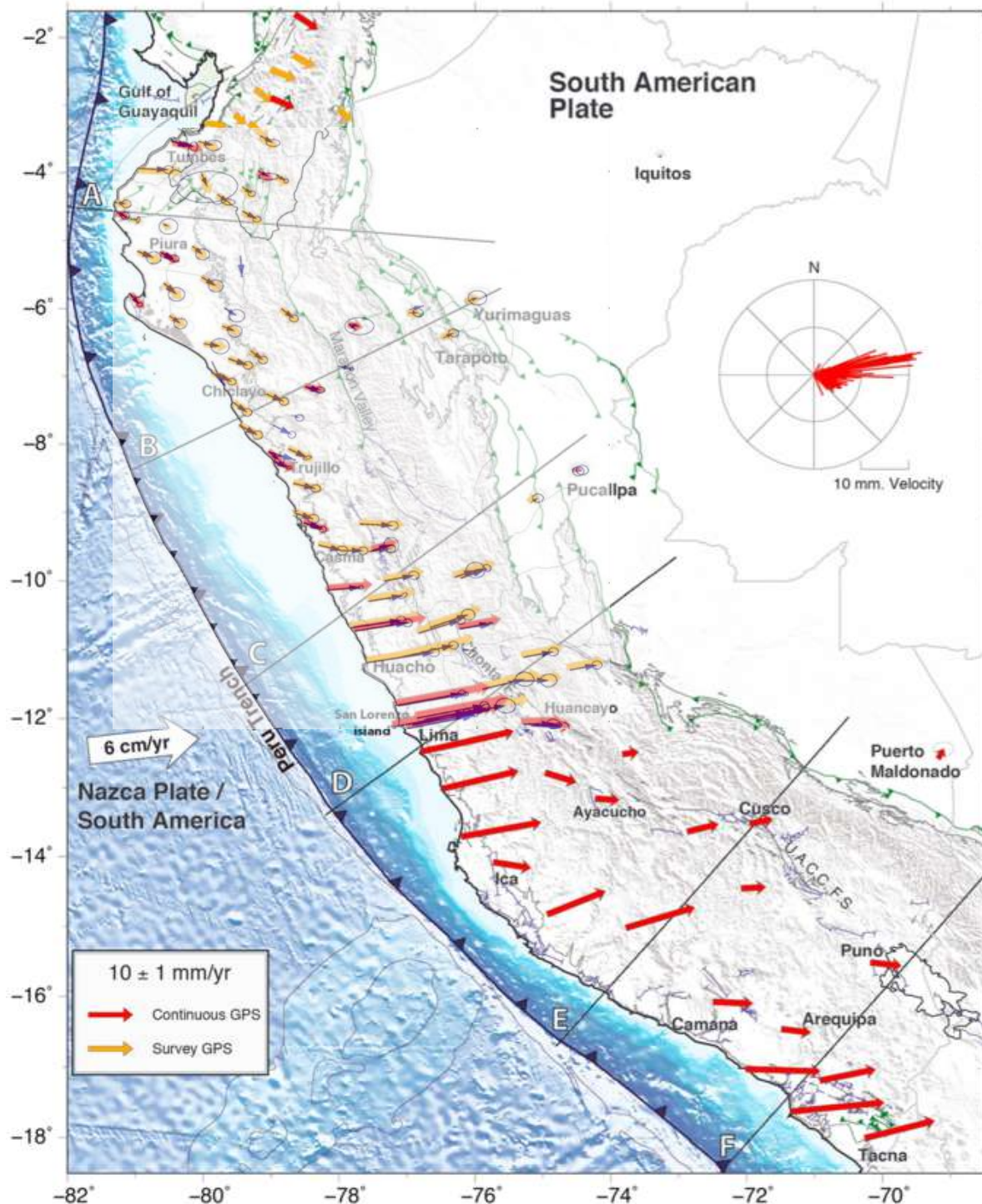


Figura 6. Campo de velocidad que muestra la actual deformación de la corteza terrestre en el Perú. Figura adaptada de los resultados de Villegas-Lanza et al (2016 y 2020).

En la Figura 6 se muestra los resultados compilados del campo de velocidad geodésico obtenidos por Nocquet et al., (2014), Villegas-Lanza et al (2016, 2020), en el marco de referencia de Sudamérica estable, es decir, respecto a un conjunto de estaciones geodésicas ubicadas en el cratón brasileño que se comportan de manera estable y rígida. Los vectores cuya magnitud se cuantifican en milímetros por año, muestran distintos patrones de deformación que varían a lo largo del margen de subducción peruano, pudiendo distinguir tres importantes patrones:

(1) En el extremo noroeste del Perú las velocidades presentan desplazamientos cuasi constantes de 5 mm/año en dirección sureste; comportamiento consistente con la hipótesis del movimiento rígido del bloque tectónico Inca, que comprende la estructura del ante-arco desde el límite de la fosa marina hasta el límite entre las cordilleras occidental y oriental, extendiéndose hacia el Altiplano en el sur del Perú. Dicha hipótesis ha sido ampliamente discutida en las investigaciones de (Nocquet et al., 2014; Villegas-Lanza, 2014, 2016).

(2) En segundo lugar, en la región central de Perú se observan velocidades en dirección Este-Nor-Este, similar a la dirección de convergencia, con tasas de 20 mm/año en la costa, disminuyendo sistemáticamente hacia el interior del continente, con valores de 1 a 2 mm/año en Iquitos y Pucallpa, respectivamente. Además, se observa variaciones laterales a lo largo del rumbo de la fosa al norte y sur de Lima, lo cual sugiere que el acoplamiento sísmico en la interfaz de subducción es fuerte y heterogéneo. En el sur del Perú, aunque con menor densidad de observaciones, se observa que el patrón de deformación es similar al de la región central, altas tasas de desplazamiento frente a las localidades de Nasca y Moquegua y Tacna del orden de 15 a 20 mm/año en dirección paralela de la convergencia de placas, disminuyendo gradualmente hacia el interior del continente con valores de 2 mm/año en Puerto Maldonado, lo que sugiere un fuerte acoplamiento sísmico en la interfaz de placas.

(3) En tercer lugar, se observa una rotación sistemática de los vectores ubicados en la cordillera oriental y la zona subandina, con tendencias hacia el NorEste. Dicho comportamiento está asociado al acortamiento cortical acomodado por los sistemas de fallas en la zona subandina (Chlieh et al 2011; Villegas-Lanza et al., 2016). En síntesis el campo de velocidad observado refleja la contribución de dos procesos: (i) el fuerte acoplamiento heterogéneo a lo largo de la interfaz de subducción, y (ii) deformación tectónica de largo plazo inducida por el bloque tectónico y el acortamiento cortical en la placa continental.

7.0 Potencial sísmico en la zona de subducción del Perú

Para determinar el acoplamiento intersísmico que se produce en la interfaz de subducción y comprender los mecanismos físicos que dan lugar a la deformación de la corteza terrestre por efecto de la acumulación y/o relajación de esfuerzos, es necesario realizar el modelado o inversión (proceso matemático) de los desplazamientos GPS medidos en superficie. Uno de los modelos que es ampliamente utilizando es el del Back-Slip propuesto por Savage, (1983), el cual permite, mediante un modelo mecánico en un medio elástico semi-infinito, calcular los parámetros que relacionan los desplazamiento GPS con los parámetros de los subsegmentos de falla en profundidad. Dado que el propósito de este modelo es

determinar el acoplamiento neto en la interfaz de subducción, los datos del campo de velocidad a modelar deben ser corregidos de cualquier otra fuente. Para el caso de la zona de subducción del Perú se corrige la contribución del bloque tectónico Inca, ya que su cinemática no contribuye significativamente al acoplamiento en la interfaz de subducción.

En la Figura 7 se muestran los resultados del modelado de acoplamiento intersísmico obtenido por Villegas et al., (2016) mediante la inversión de los desplazamientos GPS corregidos. Los resultados muestran tres importantes áreas que presentan alto acoplamiento sísmico, es decir, son áreas que están fuertemente acopladas, acumulando energía desde hace muchos años e incrementando su potencial para generar sismos de gran magnitud ($M > 8.0$) en el futuro. Estas áreas, de norte a sur, son: (1) la región central de Perú, que abarca el segmento desde Barranca hasta Pisco (> 350 km de longitud), (2) el segmento frente a las ciudades de Nasca y Chala (~ 150 km), y (3) la región sur de Perú, que abarca desde la provincia de Ilo, Tacna hasta el Norte de Chile (> 150 km).

Recientes estudios efectuados desde el año 2016 al 2019 en la zona de subducción del centro y norte del Perú, así como, en la zona del gap sísmico de Nazca, que fueron financiados con fondos de FONDECYT e INNÓVATE, respectivamente, muestran que campos de velocidad GPS son consistentes con los estudios de Chlieh et al (2011), Nocquet et al (2014), Villegas-Lanza et al (2015) y Villegas-Lanza et al (2016). No obstante, al incrementar el número de puntos de medición se obtuvo una mejor resolución de la variación lateral de la deformación y resolución del acoplamiento sísmico. Los resultados preliminares para la zona del gap sísmico de Nazca ayudan a identificar la presencia de dos asperezas ubicadas frente a la localidad de Marcona y de norte de Yauca, que espacialmente se correlacionan con las áreas de ruptura de los sismos de 1942 (8.2) y 1996 (7.6) ocurridos en dicha región (Villegas-Lanza, 2019). Los estudios anteriores, al tener poco número de observaciones GPS solo lograban identificar una sola aspereza tal como se muestra en la Figura 7.

Con relación a la región norte del país, los estudios realizados indican que el acoplamiento sísmico en dicha región es débil a moderado, lo que sugiere que la convergencia de placas en este sector se da de manera asísmica, es decir, sin que se produzca acumulación de energía suficiente como para generar terremotos de gran magnitud ($M > 8.5$). No obstante, los resultados no descartan que sismos de magnitud moderada como los ocurridos en el siglo pasado en 1996 y 1960 ($M \approx 7.6$) puedan ocurrir en cualquier momento.

El panorama general muestra que los resultados de acoplamiento intersísmico obtenidos por los estudios de deformación cortical con GNSS en los últimos años en el Perú, son consistentes con la historia sísmica, la cual evidencia que en las zonas donde actualmente el potencial sísmico es mayor, no se ha producido un terremoto

de gran magnitud desde hace varias décadas a cientos de años, por lo tanto, la acumulación de esfuerzos en dichas áreas se sigue incrementando, elevando el potencial y peligro sísmico en la costa peruana. Estos resultados contribuyen enormemente al pronóstico de grandes terremotos que ocurrirán en los próximos años en el Perú.

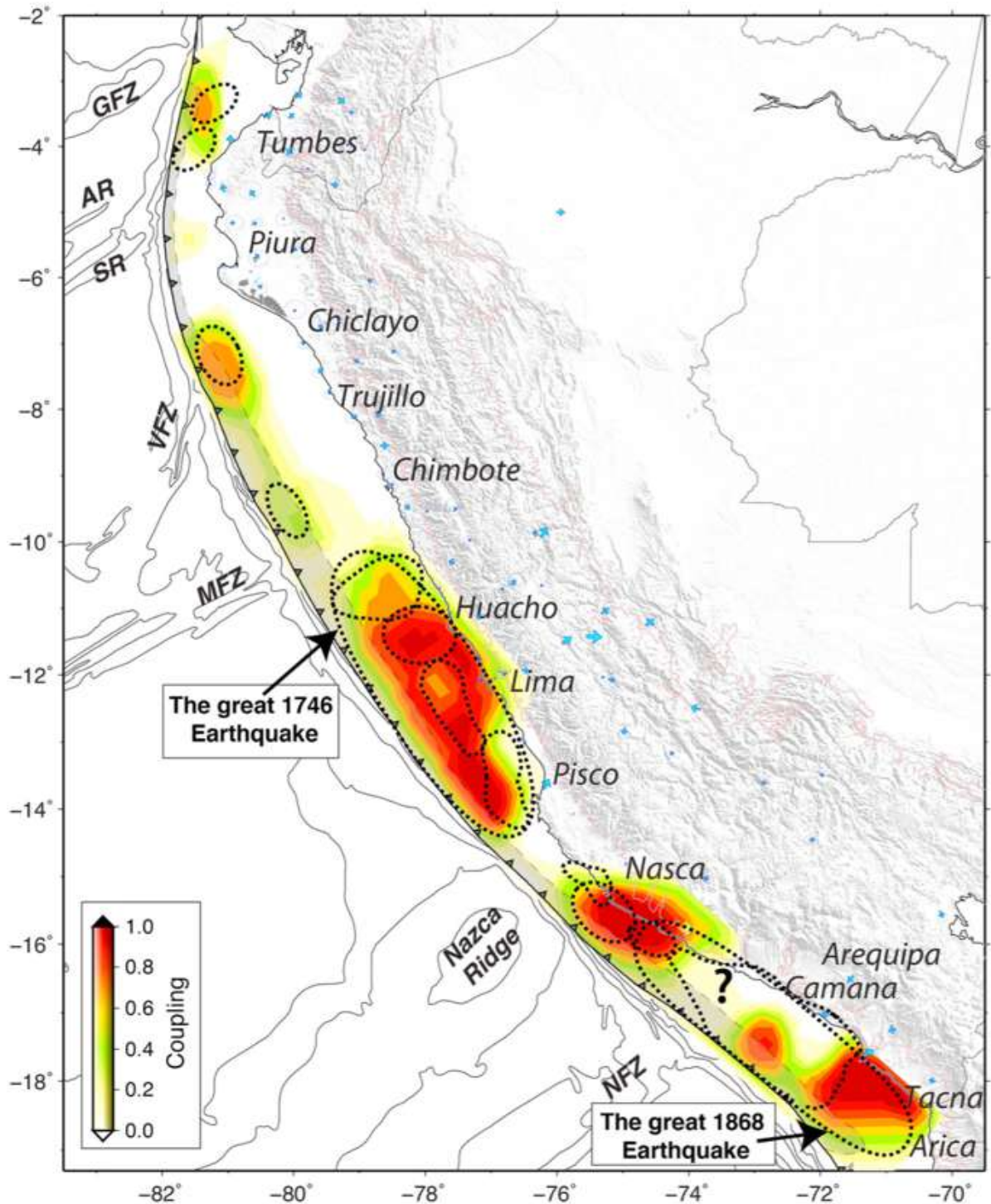


Figura 7. Mapa de acoplamiento intersísmico que muestra el actual potencial sísmico de la zona de subducción del Perú. De acuerdo a la escala de color las áreas de color rojo intenso indican zonas de la interfaz de subducción donde la acumulación de energía es alta. Los vectores sobre el mapa indican los residuales. Esta imagen ha sido tomada del estudio de Villegas-Lanza et al (2016).

8.0 Valor público de las investigaciones realizadas y su contribución a la toma de decisiones a favor de la población

El propósito misional del Instituto Geofísico del Perú es desarrollar investigación científica, innovación tecnológica y vigilancia de los peligros naturales, de manera eficiente y eficaz, para el bienestar de la sociedad. El Perú por su ubicación geográfica, situado frente a una zona de convergencia de placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, es un país de alta actividad sísmica que es afectado por la ocurrencia de terremotos de gran magnitud. La línea de investigación de deformación de la corteza terrestre del IGP, tiene por finalidad desarrollar investigación científica para generar información sobre los procesos y tasas de deformación de la corteza terrestre inducida por la tectónica de las placas y determinar el acoplamiento intersísmico en la interfaz de placas, que es un indicador clave para el pronóstico de grandes terremotos.

Los resultados de los estudios investigación en deformación cortical realizados por el IGP durante los últimos años han permitido conocer y cuantificar las causas y patrones de la deformación de la corteza terrestre e identificar las áreas de mayor potencial sísmico (áreas de mayor acumulación de energía sísmica), donde ocurrirán los próximos sismos de gran magnitud en el país. Estas investigaciones han permitido generar información y resultados que han sido materia de varias publicaciones científicas en prestigiosas revistas indexadas, que aseguran la calidad y legitimidad de los resultados (los artículos son citados en las secciones 6 y 7 y debidamente referenciados en la sección de Referencias).

La información técnica y científica que permite identificar el peligro ante la ocurrencia de peligros naturales es primordial para los procesos de la Gestión de Riesgo de Desastres (PLANAGERD, 2014), ya que sirve de insumo principal para una adecuada estimación del riesgo, útil para que los integrantes del SINAGERD puedan generar las políticas y planes de prevención y reducción del riesgo para proteger a la población. Los estudios de deformación cortical y evaluación del potencial sísmico efectuados por el IGP son de **Valor Público**, ya que sirven para la toma de acciones en los diferentes niveles de gobierno. En este sentido, se han generado algunos estudios, documentos de gestión, planes y proyectos de investigación, entre otros, en los cuales se reconoce la contribución de conocimiento científico realizada por el IGP:

- Escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8Mw (INDECI 2018)
- Escenario por sismo, tsunamis y exposición en la región central del Perú (Tavera, 2017)
- Plan de contingencia Nacional ante ante sismo de gran magnitud seguido de tsunamis frente a la costa central del Perú (PCM, 2018)
- Proyecto de investigación convenio 100-2015 FONDECYT para estudiar la deformación cortical en la región central del Perú (Villegas-Lanza 2016).

- Proyecto de investigación convenio 649-2017 INNÓVATE-PERÚ para estudiar la deformación cortical en el gap sísmico de Nazca (Villegas-Lanza 2018).
- Proyecto de investigación de la Comunidad Europea para estudiar los procesos de deslizamiento asísmico en la Dorsal de Nazca y la región sur del Perú (Socquet, 2020, IRD, ISTERre, Univ. de Grenoble).
- Proyecto de investigación del Gobierno Francés para estudiar los procesos asísmicos en la región norte del Perú (Piura, Tumbes) (Nocquet, 2020, IRD, Geoazur, Univ. de Nice).
- Participación en eventos de divulgación científica y técnica dirigidos a comunidad científica nacional e internacional, autoridades y público en general para sensibilizar y fomentar la cultura de prevención.
- Proyecto de inversión Pública del Estado Peruano “Sistema de alerta temprana de sismos del Perú” ejecutado por el IGP e INDECI 2020-2021.
- Formación de profesionales de geofísica y física mediante el desarrollo de tesis grado y postgrado.

9.0 Conclusiones

Durante la última década el Instituto Geofísico del Perú ha desarrollado proyectos de investigación en deformación de la corteza terrestre y determinación del potencial sísmico en el país. Los resultados obtenidos han contribuido a la identificación de zonas de mayor peligro y al pronóstico de sismos de gran magnitud; aportando información científica con valor público para la toma de decisiones en favor de la población. Hoy en día se conoce que la superficie de contacto de placas tectónicas en el Perú presenta complejas heterogeneidades; el segmento de la región norte, desde La Libertad hasta Tumbes presenta bajos niveles de acumulación de energía sísmica que podrían dar lugar a sismos de magnitud moderada (<M8.0). En los segmentos de la región central, frente a Ancash, Lima e Ica, y en la región sur, frente Nasca y a Moquegua y Tacna se tienen áreas con altos niveles de acumulación de energía sísmica, que generarán sismos de gran magnitud en el futuro (desde M8.0 hasta M8.8). Estos resultados constituyen conocimiento científico que sirve de base para la toma de acciones dentro del ámbito de la Gestión de Riesgo de Desastres, ya que permite priorizar zonas de intervención para estimar el riesgo y tomar acciones de reducción de la vulnerabilidad y de preparación ante la ocurrencia de sismos. Con la información generada por el IGP se han venido generando e implementando escenarios y planes de contingencia en caso de sismos de gran magnitud. Finalmente, dado que la tectónica de placas es un proceso de dinámica continua, es necesario seguir realizando investigación científica para generar mayor conocimiento sobre la génesis del peligro para que nuestro país esté mejor preparado. Para ello, se recomienda continuar fortaleciendo la red geodésica de monitoreo de la deformación de la corteza terrestre, incrementando el número de instrumentos de monitoreo.

10.0 Referencias

- Bevis, M., E., Kendrick, B. B., R. Allmendinger, B. I., and R. Smalley, Jr. (2001). On the Strength of interplate coupling and the rate of back arc convergence in the Central Andes: An analysis of the interseismic velocity field. *Geochemistry Geophys Geosystems*, 2(11), doi: 10.1029/2001GC000198.
- Chlieh, M., Perfettini, H., Tavera, H., Avouac, J. P., Remy, D., Nocquet, J. M., Rolandone, F., Bondoux, F., Gabalda, G., and Bonvalot, S. (2011). Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone. *J. Geophys. Res.*, 116(B12405), 1-21, doi: 10.1029/2010JB008166.
- Dorbath, L. A. Cisternas & Dorbath, C. (1990). Assessment if the size of large and great historical earthquake in Perú. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 551-576.
- Gagnon, K., Chadwell, C. D. and Norabuena, E. O. (2005). Measuring the onset of locking in the Peru-Chile trench with GPS and acoustic measurements. *Nature*, 434(7030), 205-208, doi: 10.1038/nature03412.
- <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>
- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R., Brooks, B., Barriga, R., Lauria, E., and Fortes, P. S. (2003). The Nazca-South America euler vector and its rate of change. *J. South Am. Earth Sci.*, 16(2), 125-131, doi: 10.1016/S0895-9811(03)00028-2.
- Mantilla Calisaya, Eliana A. (2018). Modelos de deformación cortical durante la fase intersísmicas y su comparación con velocidades GPS para la zona de subducción del Perú. (Tesis geofísica). Universidad de Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Nocquet, J. M. et al., (2014). Motion of continental sliver and creeping subduction in the northern Andes. *Nature Geoscience*, 287-291, doi: 10.1038/NGEO2099.
- Norabuena, E.O. et al., (1998). Space geodetic observations of Nazca-South America convergence across the Central Andes. *Science*, 279(5349), 358-362, doi:10.1126/science.279.5349.358.
- Plan Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres PLANAGERD 2014-2021. Secretaría de Gestión de Riesgo de Desastres de la Presidencia de Consejo de Ministros, Perú. Mayo 2014.
- Quiroz, (2016). Interseismic velocity field in southern Peru: 4 years of GPS measurements. Université J. Fourier, Grenoble, France.
- Reid, H.F. (1910) Mechanics of the earthquake, the California Earthquake of April 18, 1906. Report of the State Investigation Commission, Carnegie Institution of Washington.
- Savage, J. C. (1983). A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, vol. 88.
- Seiner Lizárraga, L. (2009). Historia de los sismos en el Perú. Catálogo: Siglos XVXVII, edited by F. Editorial, Universidad de Lima.
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). Lima-Perú.
- Tavera, H. y Bernal, I. (2005). Distribución espacial de áreas de ruptura y lagunas sísmicas en el borde Oeste de Perú. Vol. 6, SGP, 89-102.
- Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira, J. y Nocquet, J. M. (2016). Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver and Subandean shortening accommodation. *Journal of Geophysical Research*, vol. 121, doi: 10.1002/2016JB013080.
- Villegas-Lanza, J (2019). Identificación del potencial sísmico en el área del gap sísmico de Nazca. Informe resumido final de resultados el convenio 649-2017-INNOVATE
- Villegas-Lanza, J (2020). Resultados preliminares campo de velocidad GPS en las regiones norte y centro del Perú. Informe técnico al Hito 6 del convenio 100-2015-FONDECYT.