

EVALUACIÓN DE INTENSIDADES DEL SISMO DE ATACAMES DE M_w 5.3 (19/12/2016) Y ESTIMACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA DE LOS SUELOS CON MEDIDAS DE RUIDO AMBIENTAL EN ATACAMES Y TONSUPA

I. Antecedentes

El 19 de diciembre de 2016, a las 02h11 (TL), se registró un sismo de 5.3 M_w de magnitud (5.8 MI, recalculada IG-EPN*), a una profundidad de 6.4 km frente a las costas del cantón Atacames (referencia 1). El sismo se produjo en una falla cuyo movimiento es inverso tal como lo muestra el mecanismo de la ruptura en la figura 1 (referencia 2).

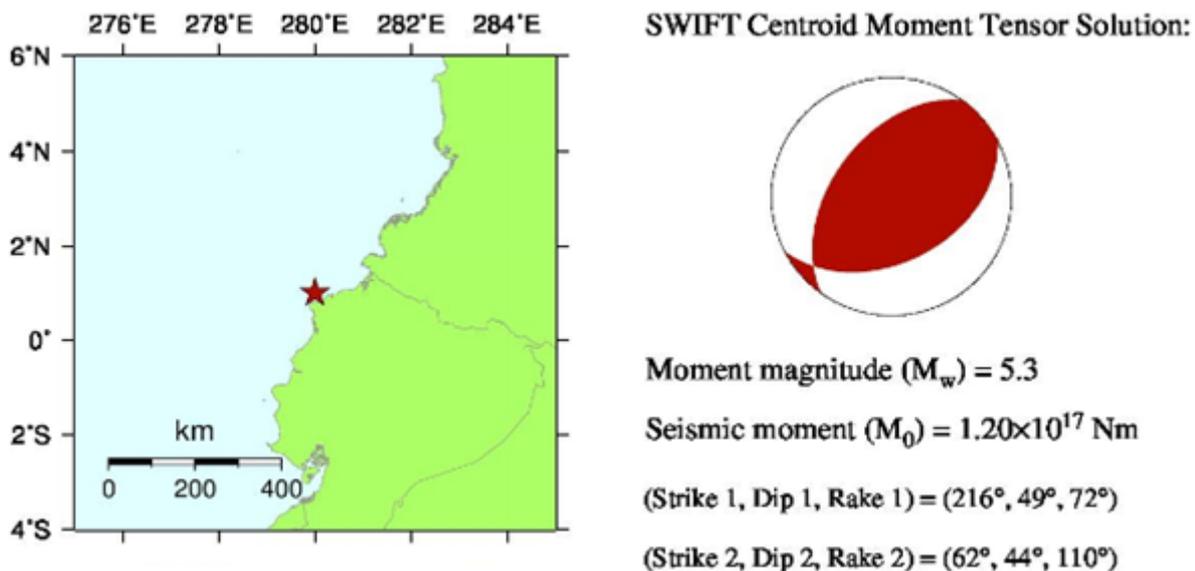


Figura 1. Mecanismo focal del evento registrado el 19/12/2016, con magnitud 5.3 M_w (referencia 2).

Este evento junto a los ocurridos en esta zona desde inicios de diciembre del año anterior, probablemente están asociados a una falla tectónica ubicada en la placa continental, que posiblemente fue activada como resultado de la variación de esfuerzos generados por el sismo de subducción del 16 de abril de 2016 (ver figura 2).

* La nueva localización del IGEPN, obtenida a partir de los datos locales recuperados más tarde en el campo, ubica el epicentro frente a las costas del cantón Atacames con una latitud de 0.9274 N y una longitud de -79.8431 W.

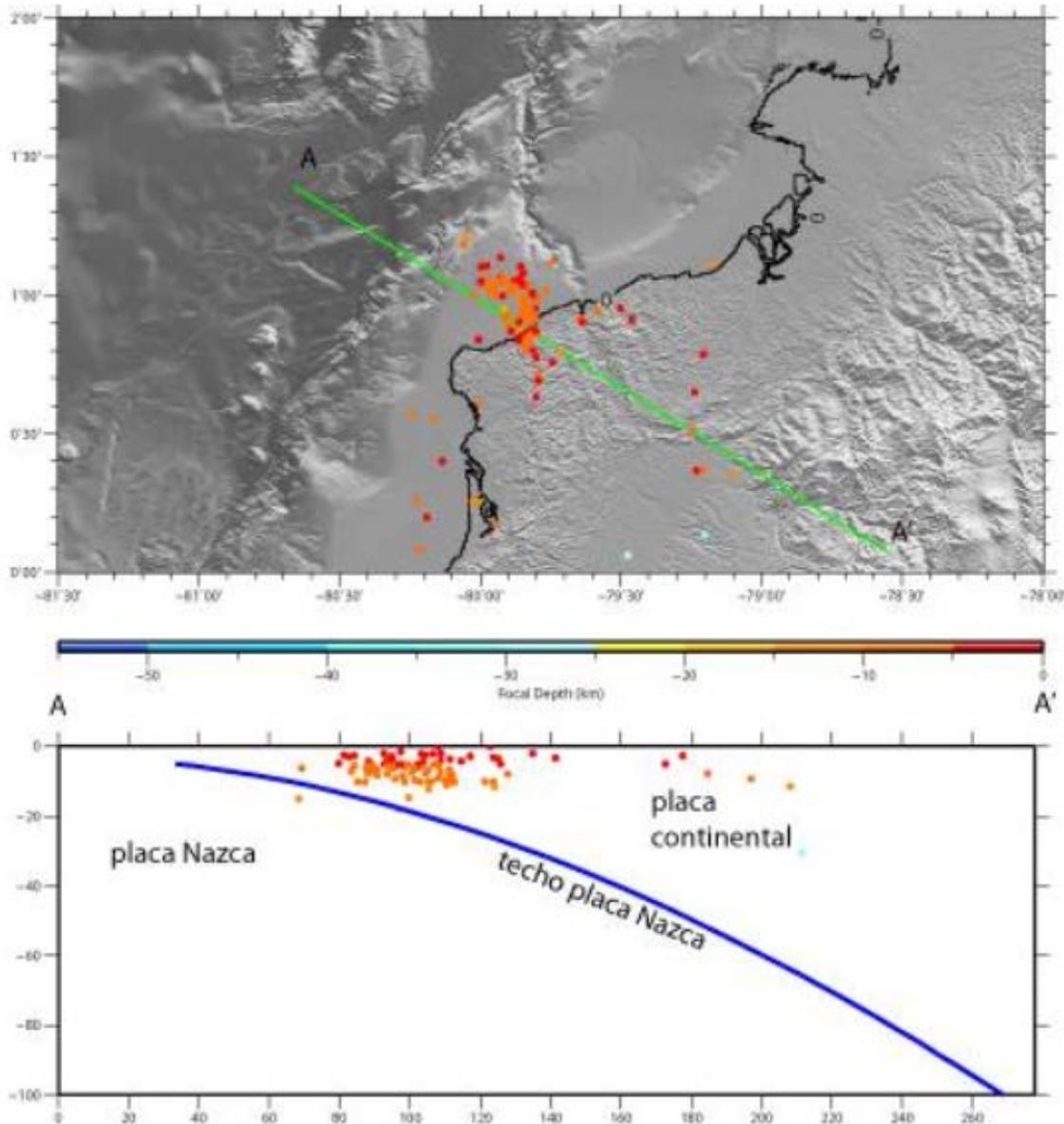


Figura 2. Localización de los eventos registrados frente a las costas del cantón Atacames (referencia 3).

La hipótesis más plausible, considerando los mecanismos focales inversos ubicados en la figura 3 junto con la línea sísmica de gran ángulo procesada por Agudelo et al. (2009, referencia 4 y figura 4), es que una falla tipo splay (SF, es decir una estructura ubicada sobre la corteza continental) es la fuente de la sismicidad registrada.

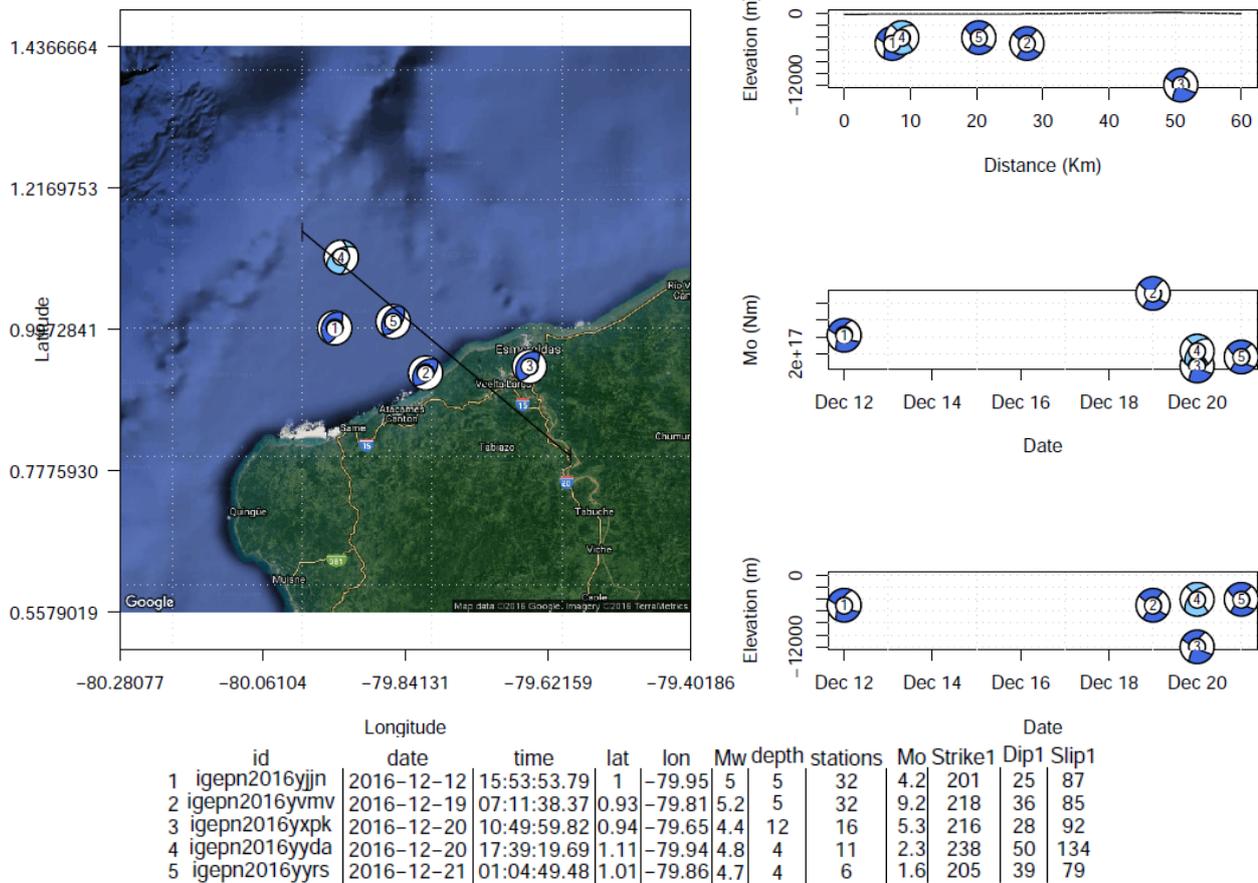


Figura 4. Mecanismos focales de la sismicidad ocurrida en el mes de diciembre de 2016 en la zona de Atacames, obtenidos a partir de la inversión de los datos de sísmica.

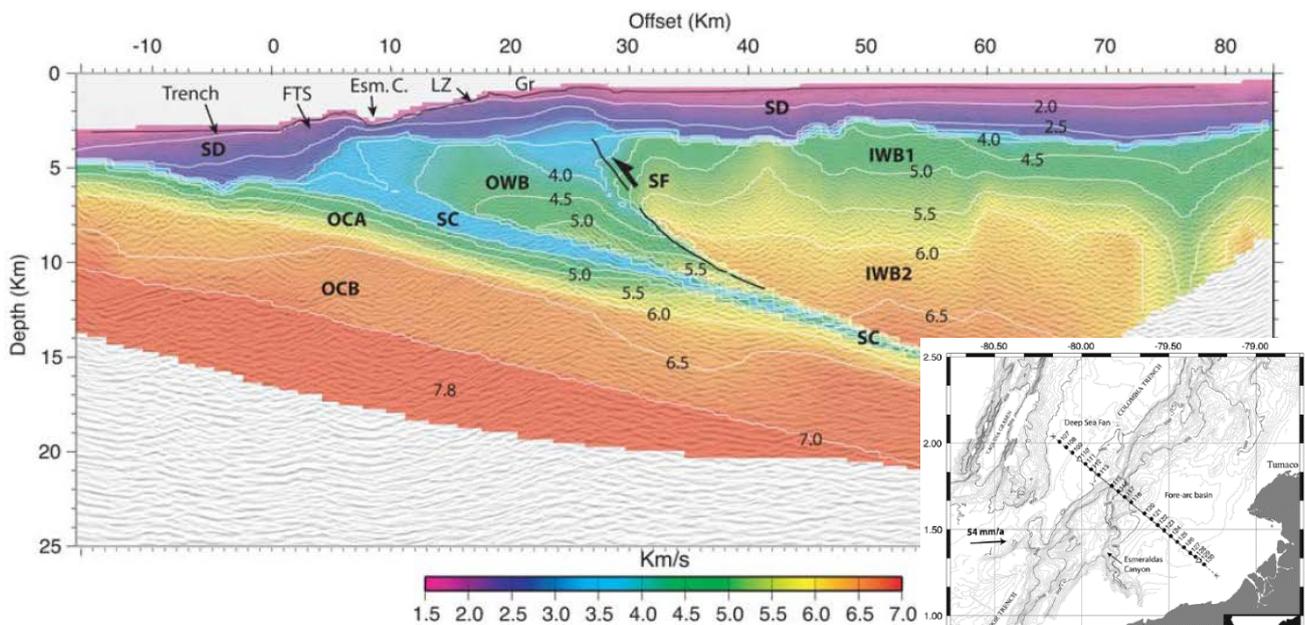


Figura 3. Línea sísmica de gran ángulo procesada por Agudelo et al. (2009). SF: Falla tipo splay; OCA y OCB: Placa Nazca; IWB1 y IWB2: Placa Sudamericana; SD: Sedimentos.

Según el informe preliminar de evaluación de intensidades (referencia 5), la parroquia Tonsupa perteneciente al cantón Atacames, provincia de Esmeraldas fue la más afectada presentando un valor de 7 EMS, este valor indica que es posible evidenciar daño en elementos estructurales de pocas edificaciones, así como daños superficiales (a nivel de mampostería) en muchas estructuras. Por otro lado, el tipo de suelo juega un papel importante en la respuesta de las edificaciones ante cargas sísmicas. A este fenómeno se le conoce como “Efecto de sitio” y para entender el comportamiento de los diferentes suelos encontrados en Tonsupa y Atacames, se utilizó el método de la razón espectral mHVSr (Nakamura, 1989), según como se describe en los siguientes apartados.

Tomando en cuenta la información antes citada, el IG-EPN decidió realizar un trabajo de inspección en campo para verificar los daños ocurridos en las estructuras por el sismo del 19/12/2016 en las ciudades de Atacames y Tonsupa; este reporte busca exponer los resultados obtenidos en dicha inspección.

II. Descripción del trabajo realizado

La intensidad sísmica es un índice no instrumental que refleja la fuerza del movimiento del suelo mediante el efecto que este produce en las personas, en los objetos y en las construcciones, en una determinada posición durante un sismo. Este índice se evalúa mediante la aplicación de la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98), la cual tiene 12 grados de intensidad e intenta crear un

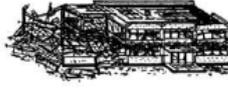
Clasificación de daños en edificios de mampostería		Clasificación de daños en edificios de hormigón armado	
	Grado 1: Sin daño o daño leve (Sin daño estructural, daño no estructural leve) Grietas muy delgadas en muy pocos muros. Caída de pequeños pedazos de entoldo. Caída de rocas sueltas desde la parte alta de edificios en muy pocos casos.		Grado 1: Sin daño o daño leve (Sin daño estructural, daño no estructural leve) Grietas delgadas en el entoldo sobre miembros del marco o en la base de los muros.
	Grado 2: Daño moderado (daño estructural leve, daño no estructural moderado) Grietas en muchos muros. Caída de pedazos grandes de entoldo. Colapso parcial de chimeneas.		Grado 2: Daño moderado (daño estructural leve, daño no estructural moderado) Grietas en columnas y vigas de marcos y en muros estructurales. Grietas en paredes interiores; caída de cubierta y entoldo quebrado. Caída de mortero en las uniones de paneles.
	Grado 3: Daño substancial a severo (daño estructural moderado, daño no estructural moderado) Grietas largas y extensas en casi todos los muros. Caída de tejas. Fractura de las chimeneas en la línea del techo; falla de elementos individuales no estructurales (paredes interiores).		Grado 3: Daño substancial a severo (daño estructural moderado, daño no estructural severo) Grietas en uniones de columnas y vigas de marcos, en la base y en las uniones de muros acoplados. Desacoplamiento de cubierta de concreto. Torcedura de vanillas de refuerzo. Grandes grietas en paredes interiores.
	Grado 4: Daño muy severo (daño estructural severo, daño no estructural muy severo) Falla seria en muros; falla estructural parcial de techos. Falla de techos y pisos.		Grado 4: Daño muy severo (daño estructural severo, daño no estructural muy severo) Grandes rajaduras en elementos estructurales con falla a compresión de concreto y fractura de vanillas de refuerzo. Ruptura de uniones de vigas reforzadas; inclinación de columnas. Colapso de algunas columnas o de un único piso superior.
	Grado 5: Destrucción (daño estructural muy severo) Colapso o casi colapso total.		Grado 5: Destrucción (daño estructural muy severo) Colapso de planta baja o parte de edificios.

Figura 5. Clasificación de daños en edificios de mampostería y de hormigón armado, fuente EMS-98.

vínculo entre la sismología y la ingeniería (referencia 6), ampliando el número de tipos de edificación, definiendo mejor el grado de daño y sustentándose estadísticamente (ver figura 5). Para el caso de la ciudad de Atacames, se conformó un equipo de trabajo que visitó la zona afectada durante los días 26, 27 y 28 de diciembre de 2016. En Tonsupa, por ejemplo, se pudo observar varios niveles de daño según el sector analizado. Una primera zona identificada consiste en viviendas residenciales de hasta dos pisos con autoconstrucciones mixtas o de hormigón armado, una segunda zona presenta edificaciones de entre 2 a 7 pisos de hormigón armado sin diseño sismoresistente o con diseño sismoresistente moderado, y una tercera zona con edificaciones de hasta 30 pisos con diseño sismoresistente alto.

5

La zona I presenta paredes desvinculadas de la estructura, mampostería agrietada y ciertas paredes exteriores caídas (ver figura 6).



Figura 6. Daños en edificaciones Zona I (Tonsupa).

La zona II que concentra los mayores daños, presenta pocas edificaciones colapsadas por patologías estructurales como piso blando o con mala configuración estructural, algunas edificaciones con daño estructural substancial a severo es decir falla a compresión del concreto, torcedura de varillas de refuerzo, grandes grietas en paredes, y muchas edificaciones con daño leve a moderado presentando grietas delgadas en enlucidos y grietas en paredes interiores (ver figura 7).



6

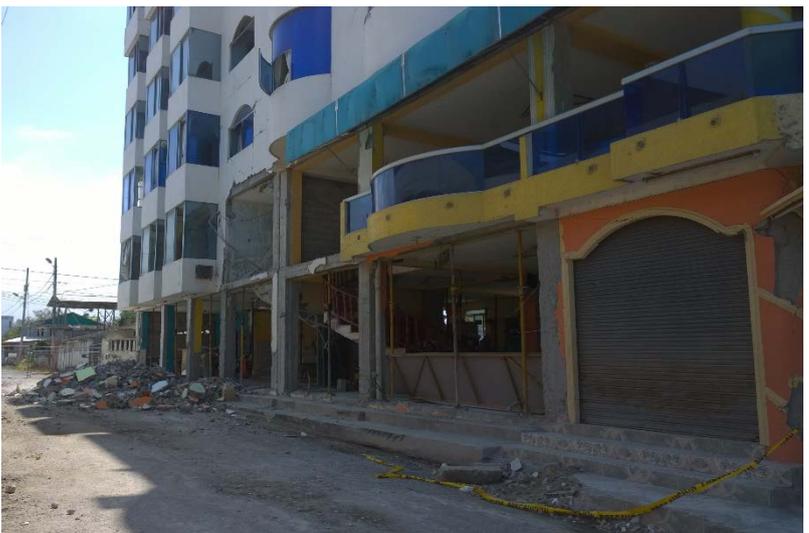
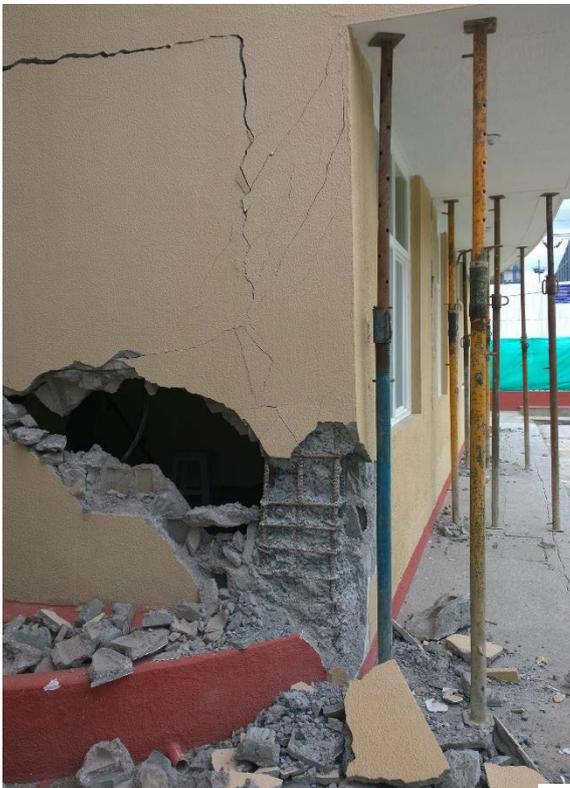
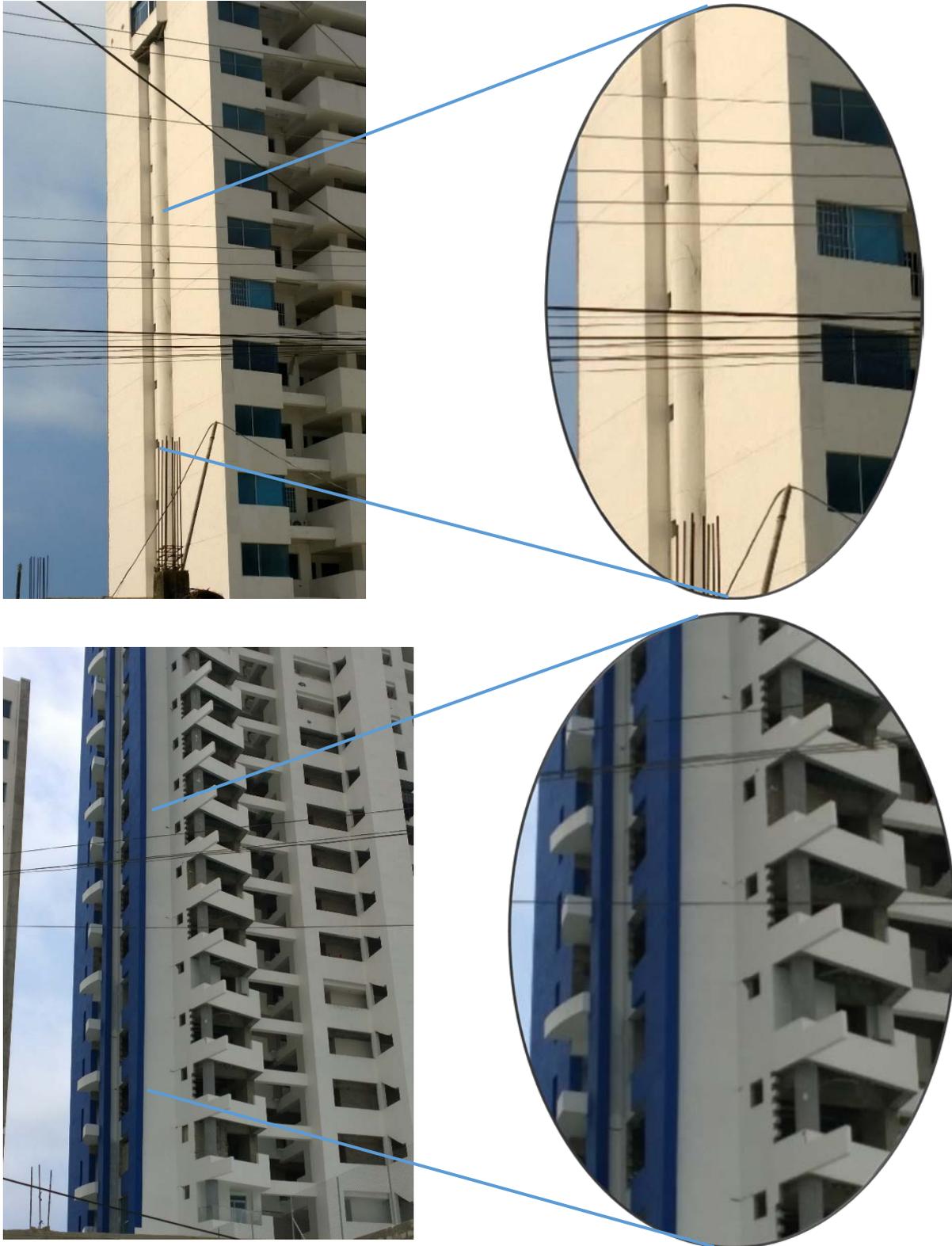


Figura 7. Daños en edificaciones Zona II (Tonsupa).

En la zona III, las edificaciones con diseño sismoresistente alto presentan un grado de daño 1, es decir sin daño estructural y daño no estructural leve (ver figura 8).



7

*Figura 8. Daños en edificaciones Zona III
(Tonsupa).*

La ciudad de Atacames presenta tan solo una edificación con daño estructural severo, y pocas edificaciones con daño leve a moderado (ver figura 9).

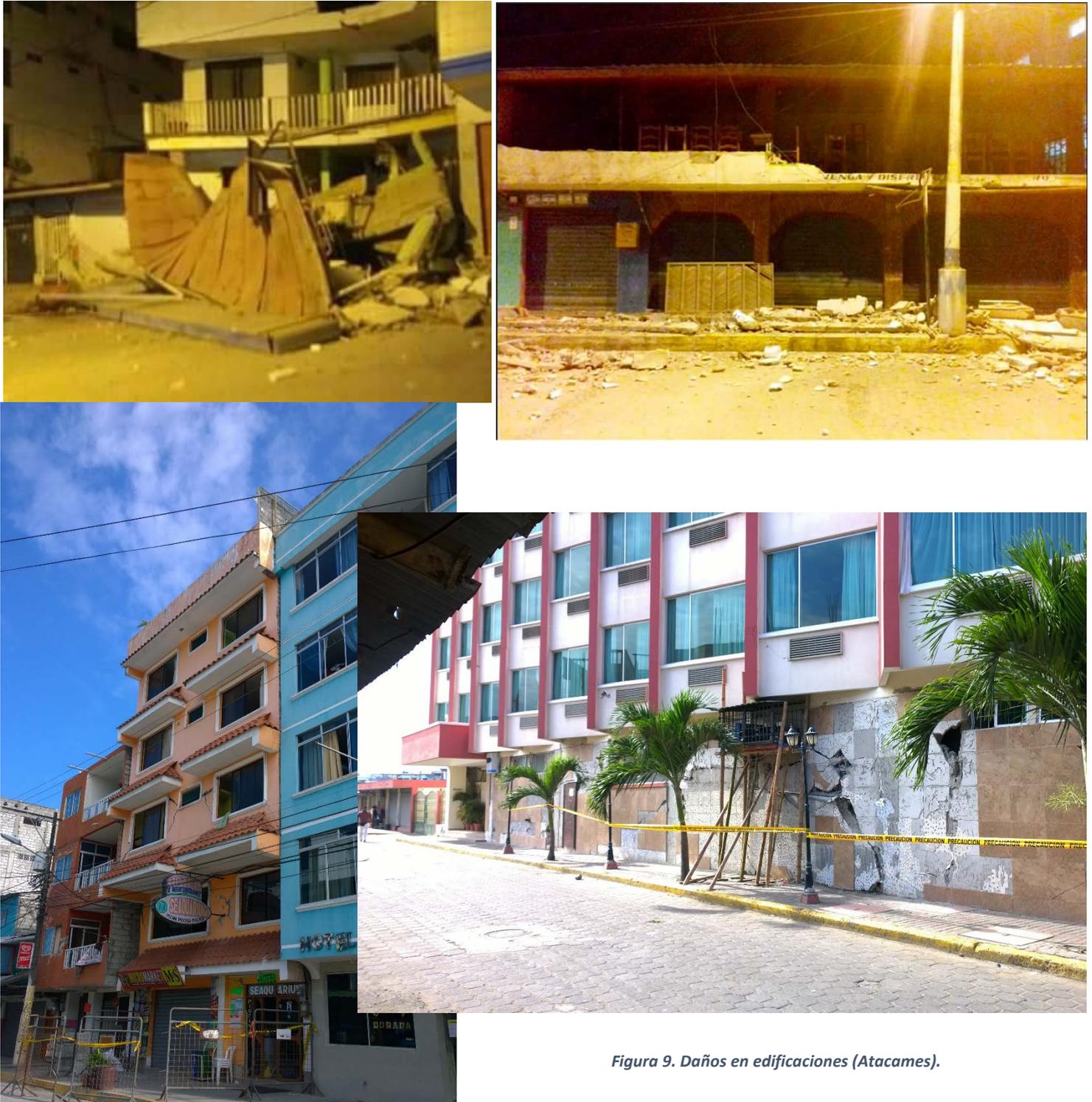


Figura 9. Daños en edificaciones (Atacames).

Se decidió en campo además, realizar unas medidas de ruido ambiental en la parroquia de Tonsupa, buscando responder de manera alternativa los daños encontrados en las edificaciones dado un sismo de baja magnitud como el suscitado el 19/12/16.

Las medidas de ruido ambiental permiten obtener la frecuencia fundamental de resonancia del suelo (o las frecuencias de resonancia), con la presencia de fuertes contrastes de impedancia. El análisis se hace a través de las relaciones espectrales de las componentes horizontales del sensor sobre la componente vertical, mHVSr (referencia 7).

Es importante especificar que esta metodología permite obtener solamente las frecuencias de resonancia y no la amplitud de las funciones de transferencia de los sitios. La amplitud obtenida con mHVSr es solamente relativa y permite dar una primera idea de los sitios con mayor amplificación (referencia 8).

En total se logró tomar 7 medidas de ruido del ambiente en Tonsupa, valorando sobre todo en los lugares que presentaron edificaciones con mayores daños (ver figuras 10 y 11).



Figura 10. Toma de medidas de ruido del ambiente en diferentes puntos de la parroquia Tonsupa.

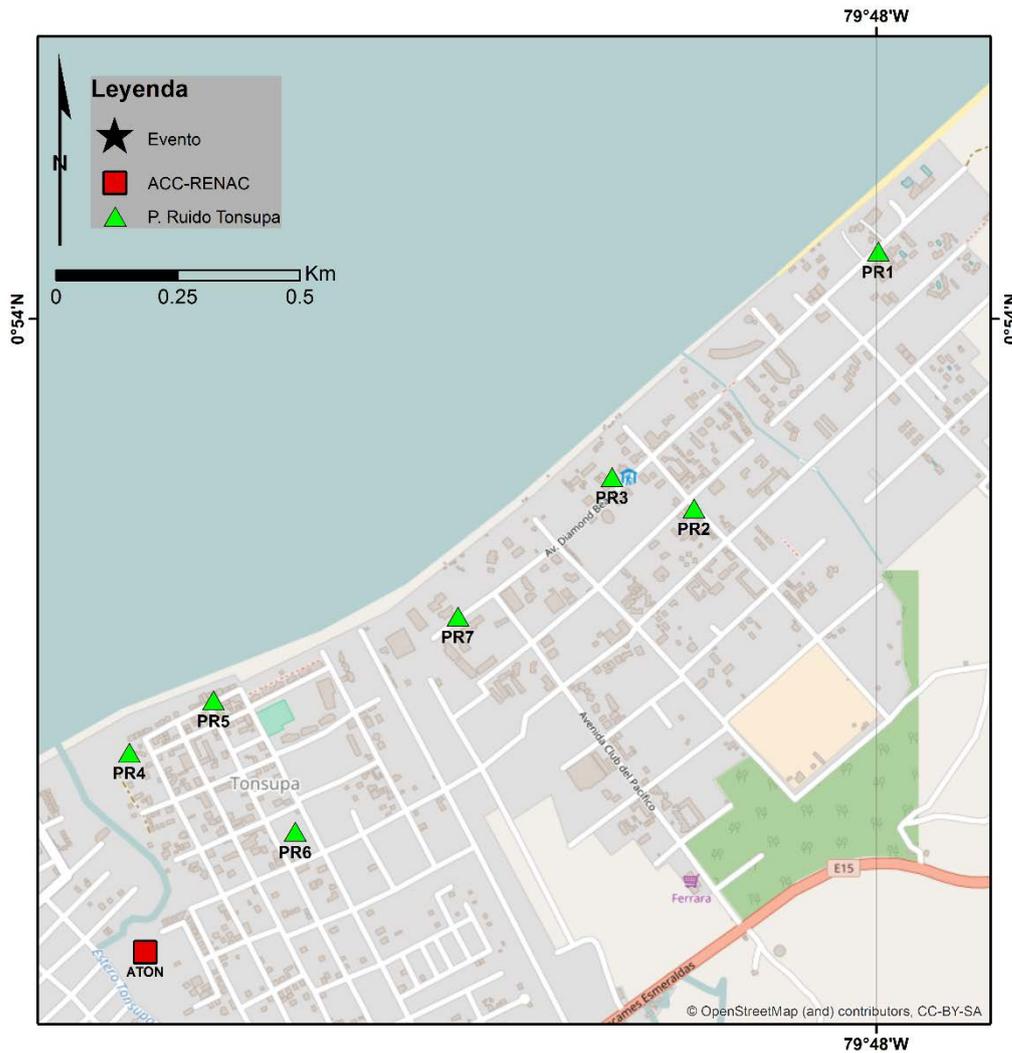


Figura 11. Lugares donde se obtuvo la medida de ruido del ambiente en la parroquia de Tonsupa, triángulo verde.

III. Interpretación de los registros de aceleración

Al analizar los registros de las estaciones acelerográficas ubicadas en la zona epicentral, se observa que las estaciones de Tonsupa (ATON) y Atacames (AATC) registraron las aceleraciones más altas (ver figura 12 y tabla 1).

En la figura 13, se puede apreciar 11 de los acelerogramas con el registro del sismo del 19 de diciembre a diferentes distancias (5 a 175km). Se observa los diferentes tiempos de arribo de las ondas en función de la distancia. Normalmente, la amplitud baja en función de la distancia, excepto en contexto donde existan efectos de sitios que puedan generar amplitudes y duraciones más largas.

Se nota especialmente en el caso de los registros de la estación ASAM que presenta amplitud y duración más pequeñas que las estaciones AMA1 y AES1 que están más lejos del epicentro (ver figuras 13 y 14).

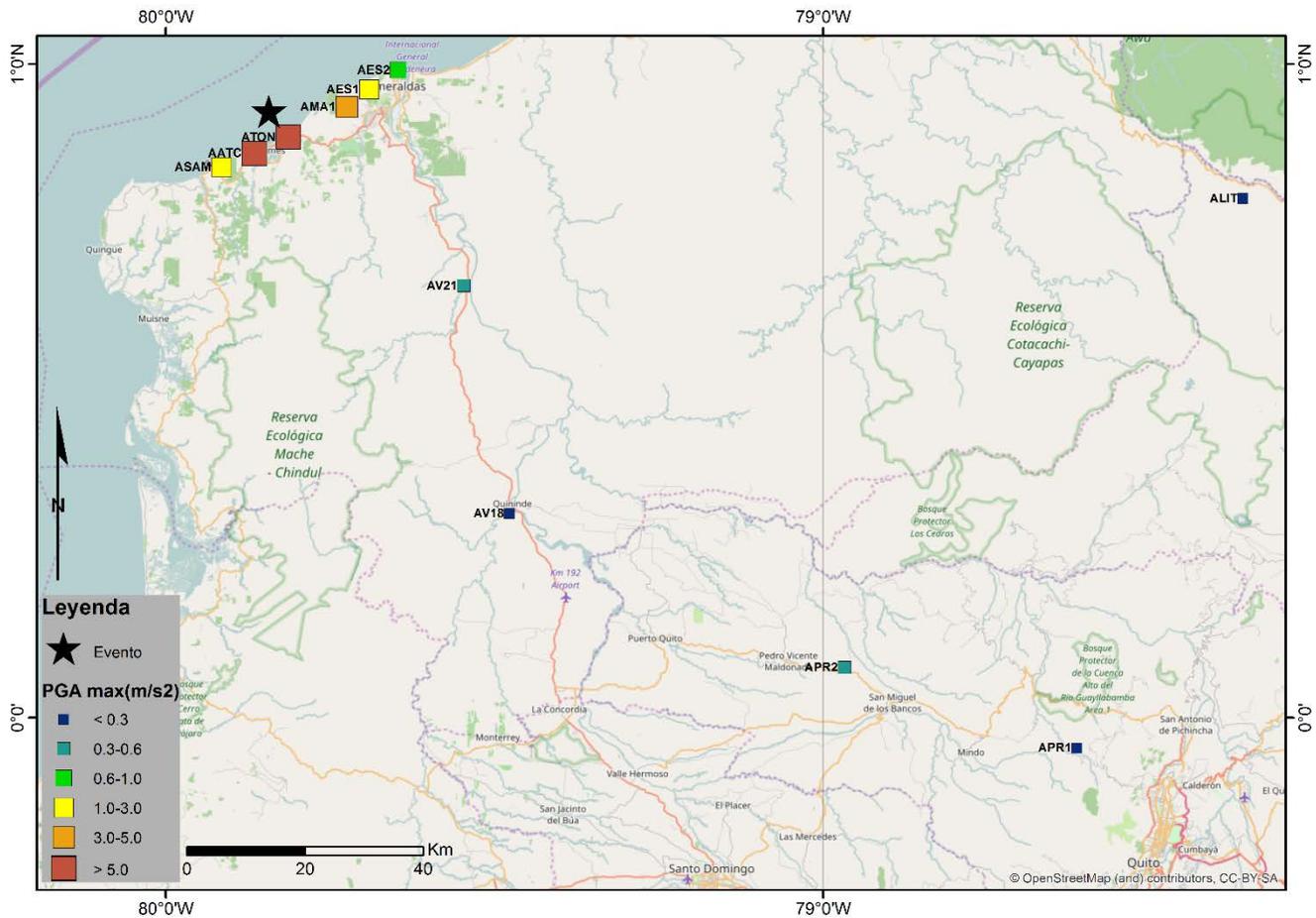


Figura 12. Distribución espacial de las estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC) y de la red del Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), cuyos valores de aceleraciones sísmicas son presentados en este informe. Los valores presentados corresponden a los valores máximos de los tres componentes (PGA: Peak Ground Accelerations) en m/s². La estrella negra corresponde al epicentro.

Estación	Lat.	Lon.	Altitud (m)	D-epi (km)	PGA E (m/s ²)	PGA N (m/s ²)	PGA Z (m/s ²)	PGA geo-meanH (m/s ²)
ATON	0,888233	-79,813483	10	5,5	8,964	8,527	3,460	8,743
AATC	0,863166	-79,86485	15	7,5	4,921	5,110	3,520	5,015
ASAM	0,842683	-79,915183	116	12,4	1,259	1,779	1,030	1,497
AMA1	0,934583	-79,724417	234	13,2	3,401	2,705	1,188	3,033
AES1	0,961283	-79,69055	170	17,4	2,007	2,012	0,521	2,010
AES2	0,990833	-79,646183	4	23,0	0,630	0,534	0,301	0,580
AV21	0,66094	-79,54691	62	44,3	0,456	0,527	0,405	0,490
AV18	0,31278	-79,4776	107	79,6	0,143	0,231	0,091	0,182
APR2	0,07673	-78,9676	804	135,9	0,367	0,155	0,061	0,238
ALIT	0,7945	-78,3611	1554	165,6	0,081	0,076	0,033	0,078
APR1	-0,04637	-78,61374	2981	174,6	0,129	0,108	0,048	0,118

Tabla 1. Valores de la máxima amplitud (m/s²) para cada componente y promedio geométrica de las componentes horizontales. Lat. Latitud, Lon. Longitud. D-epi Distancia epicentral, PGA (E,N,Z) pico de aceleración máxima en tres componentes del sensor.

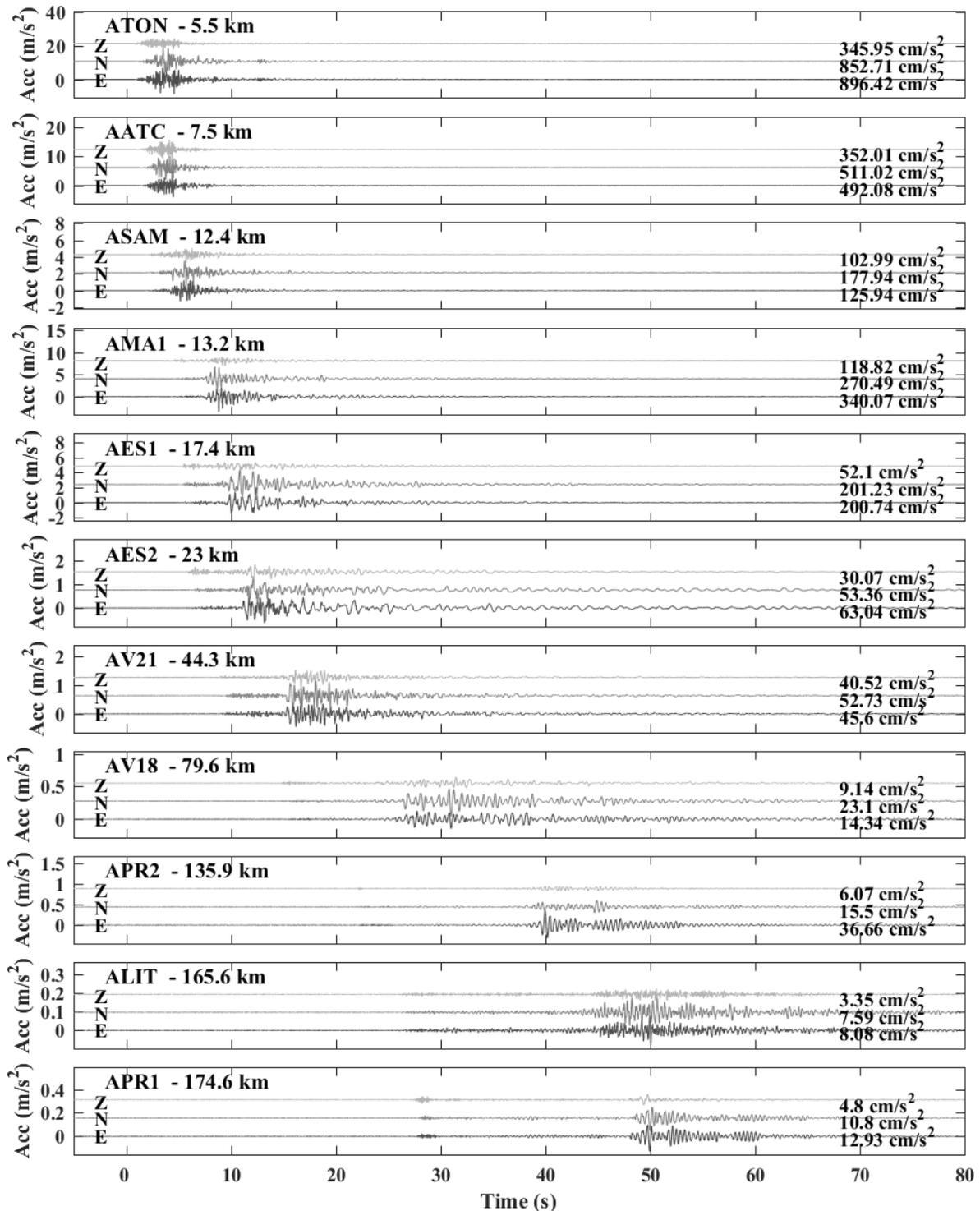


Figura 13. Acelerogramas del terremoto de las 02:11 (HL) del 19 de diciembre de 2016 ordenados con respecto a la distancia epicentral. El tiempo de origen (0 s) corresponde al momento de ocurrencia del evento. La escala vertical cambia para observar bien la señal.

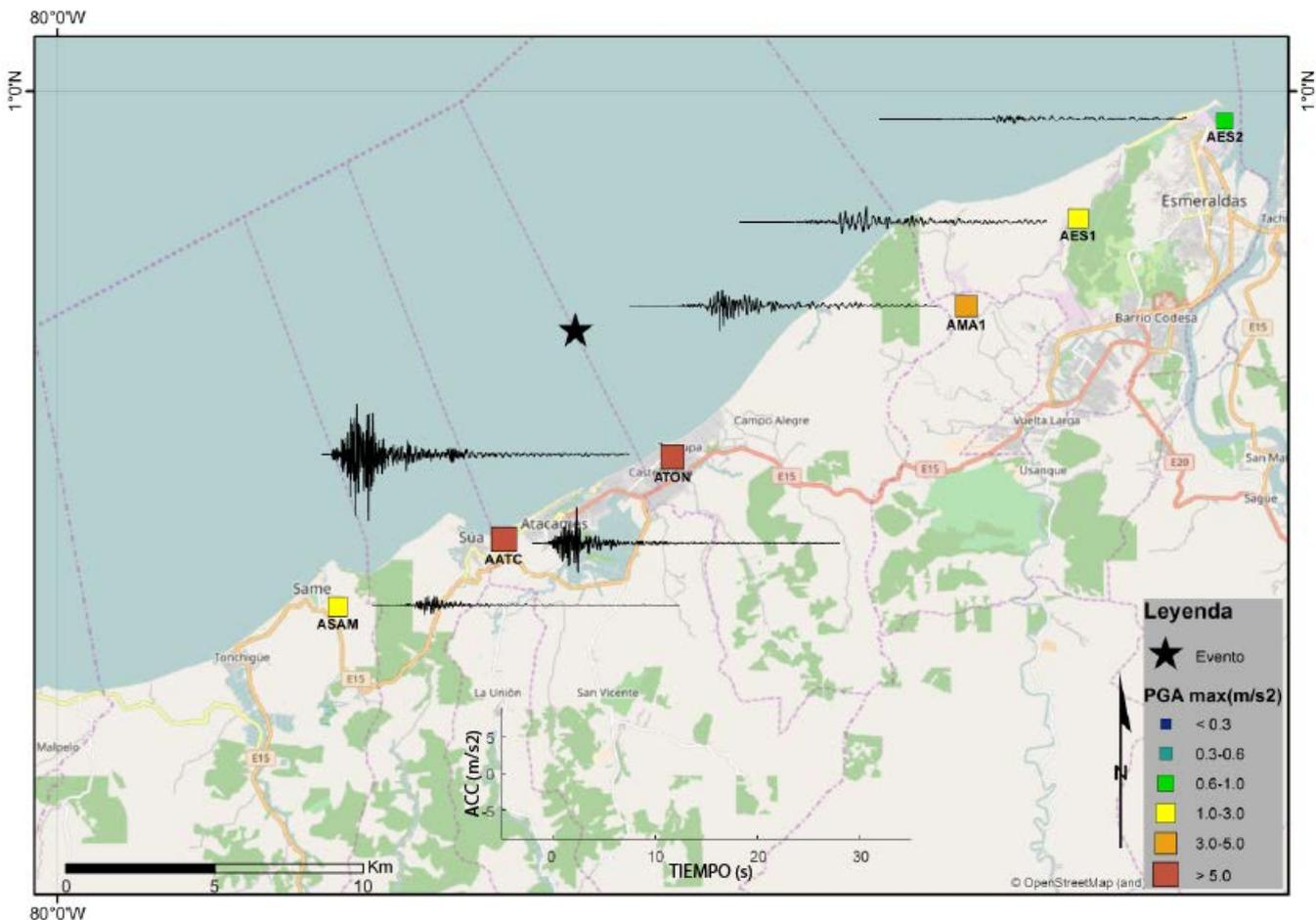


Figura 14. Distribución espacial de los registros acelerográficos de la componente este de la RENAC, del evento del 19/12/2016.

En el contexto de las estaciones de la RENAC, es posible estudiar los efectos de sitio a partir de eventos con la metodología de la razón espectral entre las componentes horizontales y la componente vertical [eHVSr], que permite como en el caso de la metodología Mhvsr únicamente encontrar la frecuencia fundamental de resonancia, en presencia de una diferencia importante de tipo de suelo (e.g., Lermo and Chavez-Garcia, 1993, referencia 10).

Todos los eventos que están reportados en el catálogo del IGEPN para los cuales tenemos un registro y que presentan un cociente entre la señal del evento y del nivel de ruido superior a 3, al menos para una frecuencia han sido usados. Además, para determinar la respuesta lineal se usa solamente los eventos que producen una amplitud máxima (PGA), inferior a 0.1 g (muchos estudios mantienen la hipótesis que este nivel de PGA puede separar los efectos lineales de los efectos no lineales en el suelo).

La figura 15 presenta para 6 estaciones, las curvas eHVSr que corresponden a la respuesta lineal obtenida con varios eventos y las curvas eHVSr del evento del 19/12/2016.

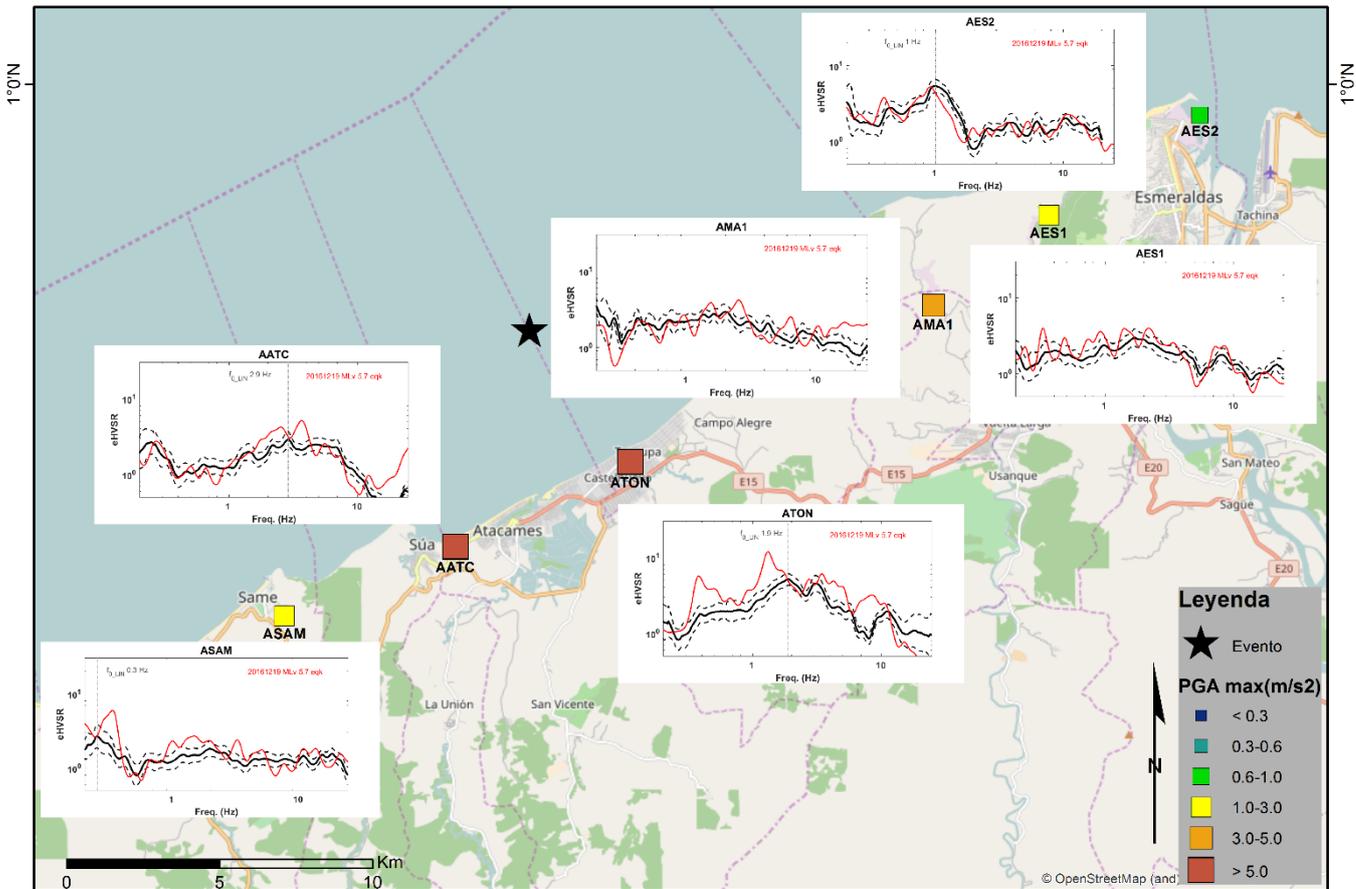


Figura 15. Distribución espacial de las respuestas eHVSr de las estaciones cercanas al epicentro del evento del 19/12/2016. En negro, la respuesta lineal y en rojo la respuesta correspondiente al evento del 19/12/2016. Cuando hay un pico claro, la frecuencia está indicada en el gráfico.

Primero, con las curvas eHVSr lineales (en negro), es posible observar claramente que la estación ATON es la que presenta las amplitudes más altas sobre un rango de frecuencia amplio entre 1 y 5 Hz aproximadamente. La estación AATC presenta también una amplitud alta (pero menos que ATON) en el rango de frecuencia de 2 a 7 Hz. La estación ASAM presenta una respuesta muy plana que está de acuerdo con su ubicación sobre un suelo tipo roca. Las estaciones AMA1 y AES1 no presentan amplitudes muy altas, pero una ligera amplificación con un máximo alrededor de 2 Hz. La estación AES2 presenta un pico claro a 1 Hz. Además, solamente en el caso de la estación ATON, se nota una diferencia de las curvas eHVSr lineales con la respuesta eHVSr del evento del 19/12/2016. En el caso de ATON, se registró aceleraciones altas de 0.9g. Con este evento se observa picos más marcados, uno primero a 0.3 Hz; después el pico a 1.9 Hz se observa claramente a una frecuencia más baja alrededor de 1.3 Hz. Esta diferencia puede ser característica de un efecto no lineal pero no se observa en el campo evidencias de estos efectos.

IV. Interpretación de las intensidades

De acuerdo a los daños observados en las diferentes estructuras, la máxima intensidad evaluada es 7 EMS en Tonsupa, lo que corresponde a que algunas edificaciones presentan daño en los elementos estructurales, llegando a fallas por compresión en el hormigón de las columnas e inclinación de las mismas (ver figura 16).

En Atacames, se evaluó una intensidad de 6 EMS, ya que pocas edificaciones sufrieron un daño estructural leve (ver figura 16).

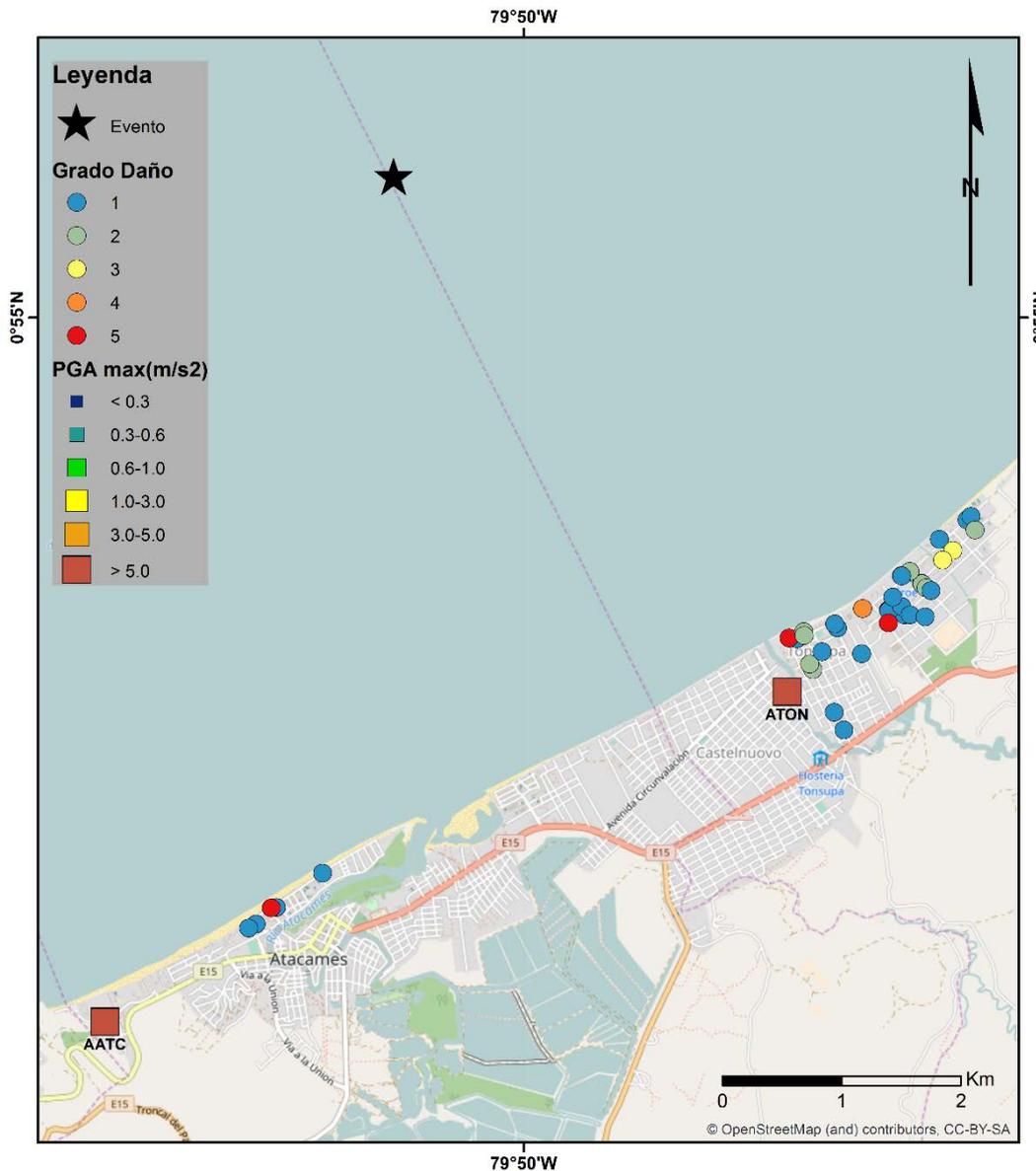


Figura 16. Grado de daño en las edificaciones evaluadas en Atacames y Tonsupa.

V. Interpretación de las medidas de ruido ambiental

Los resultados observados en los 7 puntos medidos de ruido ambiental, indican que el subsuelo de Tonsupa es heterogéneo (ver figura 17).

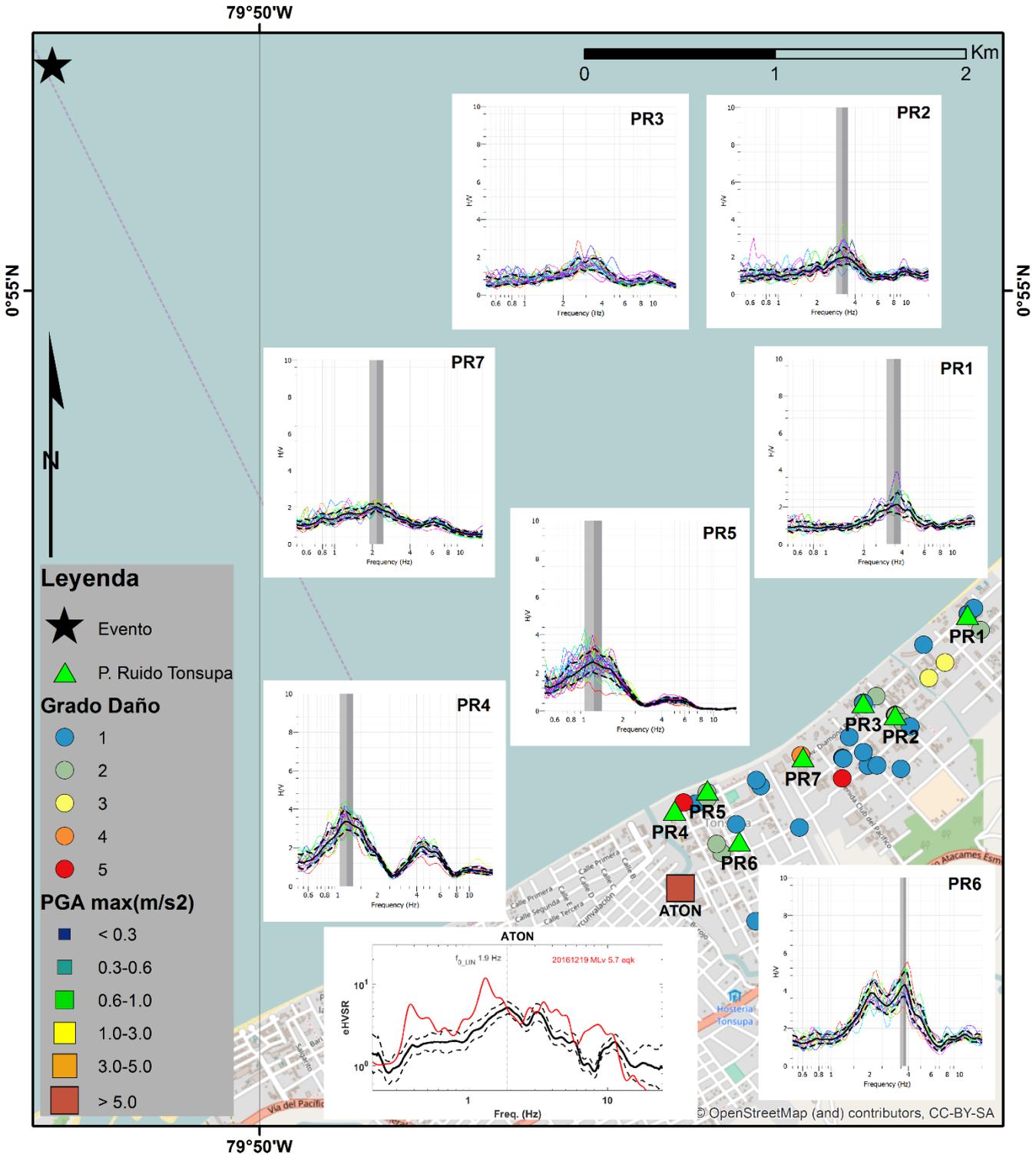


Figura 17. Razones espectrales, de las componentes horizontales sobre las verticales con más-menos una desviación estándar, de las 7 medidas de ruido del ambiente tomadas en Tonsupa.

De hecho, las curvas de mHVSr obtenidas presentan una variabilidad importante entre ellas. Hay una diferencia clara entre el noreste de la parroquia, con curvas mHVSr que no presentan picos muy claros, una ligera amplificación alrededor de 3 Hz (PR7, PR3, PR1, PR2 y PR6); y el suroeste (PR5, PR4, PR6) para lo cual las curvas presentan picos de amplificación claros: PR5 y PR4 presentan un primer pico claro alrededor de 1 Hz, y PR4 un segundo pico claro entre 4 y 6 Hz. En el caso de PR6, se observa un pico de amplitud alta para un rango de frecuencia largo entre 1.5 y 6 Hz.

Nota: Los resultados de mHVSr son comparables a los resultados de eHVSr con eventos de aceleraciones pequeñas. Como se observa a la estación ATON, una aceleración alta en un sitio puede generar una respuesta del suelo diferente de lo que se observa en un comportamiento lineal.

VI. Conclusiones y Recomendaciones

- El evento del 19 de diciembre de 2016 de 5.3 Mw de magnitud, generó un pico de aceleración máxima de 8,74 m/s² registrado en la estación ATON, produciendo así una intensidad de 7 EMS en la localidad de Tonsupa y de 6 EMS en Atacames. Este valor de aceleración es alto, considerando la magnitud del sismo y podría deberse a un efecto de suelo muy importante.
- Se puede ver con el análisis de las curvas mHVSr y eHVSr, que la zona sur occidental de Tonsupa (malecón) puede presentar efectos de sitio ante cargas cíclicas como las ocurridas en un sismo.
- Los daños observados durante esta campaña de evaluación no corresponden a un evento de baja magnitud como el registrado el 19/12/16; esta conclusión puede ser explicada debido a varios factores como: efectos de sitio debido al tipo de suelo de la zona, también a que ciertas edificaciones se encontraban ya con daños debidos al sismo de abril de 2016 y también por problemas constructivos.
- Se recomienda realizar estudios geotécnicos y geofísicos en detalle sobre el subsuelo de Atacames y Tonsupa, buscando así mejorar el ordenamiento territorial de las zonas propensas a sufrir un evento sísmico en el futuro, sobre todo por la presencia de estos valores de aceleración tan altos y por la variabilidad de frecuencias de vibración.
- Se recomienda mejorar la evaluación de edificaciones post-desastre.

VII. Bibliografía

- (1) <http://www.igeqn.edu.ec/portal/ultimo-sismo/informe-ultimo-sismo.html>
- (2) <http://www.igeqn.edu.ec/informes-sismicos/sismicos-especiales/sism-e-2016/16697-informesi-smicoespecialn-39/file>
- (3) <http://www.igeqn.edu.ec/informes-sismicos/sismicos-especiales/sism-e-2016/16705-informesi-smicoespecialn-40/file>

- (4) Agudelo, W., Ribodetti, A., Collot, J.Y. & Operto, S., (2009). Joint inversion of multichannel seismic reflection and wide-angle seismic data; improved imaging and refined velocity model of the crustal structure of the north Ecuador-south Colombia convergent margin, J. geophys. Res., 114(B2). <http://dx.doi.org/10.1029/2008JB005690>
- (5) <http://www.igepn.edu.ec/informes-sismicos/sismicos-especiales/sism-e-2016/16706-informesi-smicoespecialn-41/file>
- (6) Grünthal, G. (Edit.). 1998. European Macroseismic Scale 1998, EMS-98. Conseil de L'Europe Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 15. Luxembourg. 99p.
- (7) Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface. QR of RTRI. 1;30:25–33.
- (8) Laurendeau, A., Barros, J-G., Alvarado A., y otros, Estimación de las frecuencias de resonancia de los suelos en varias ciudades de la provincia de Manabí con medidas de ruido del ambiente, Noviembre 2016.
- (9) Lermo, J. and F.J. Chavez-Garcia, (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, Bull. Seism. Soc. Am. 83, 1574-1594.