

Caracterización e Investigación Sísmica Preliminar en la Región Sur-Este de Puerto Rico

Investigador Principal: Lillian Soto-Cordero, MS

Co-Investigadores: Dr. Víctor Huérfano Moreno y Prof. Christa von Hillebrandt-Andrade

I. Introducción

En los pasados años la Red Sísmica de Puerto Rico (RSPR) de la Universidad de Puerto Rico-Mayagüez ha observado un cambio significativo en el comportamiento sísmico en la región sur-este de Puerto Rico, entre las coordenadas latitud 18.00°N - 18.15°N y longitud 66°W - 62°W . Esta área incluye los pueblos de *Guayama, Arroyo, Patillas y Cayey* (Figura 1).

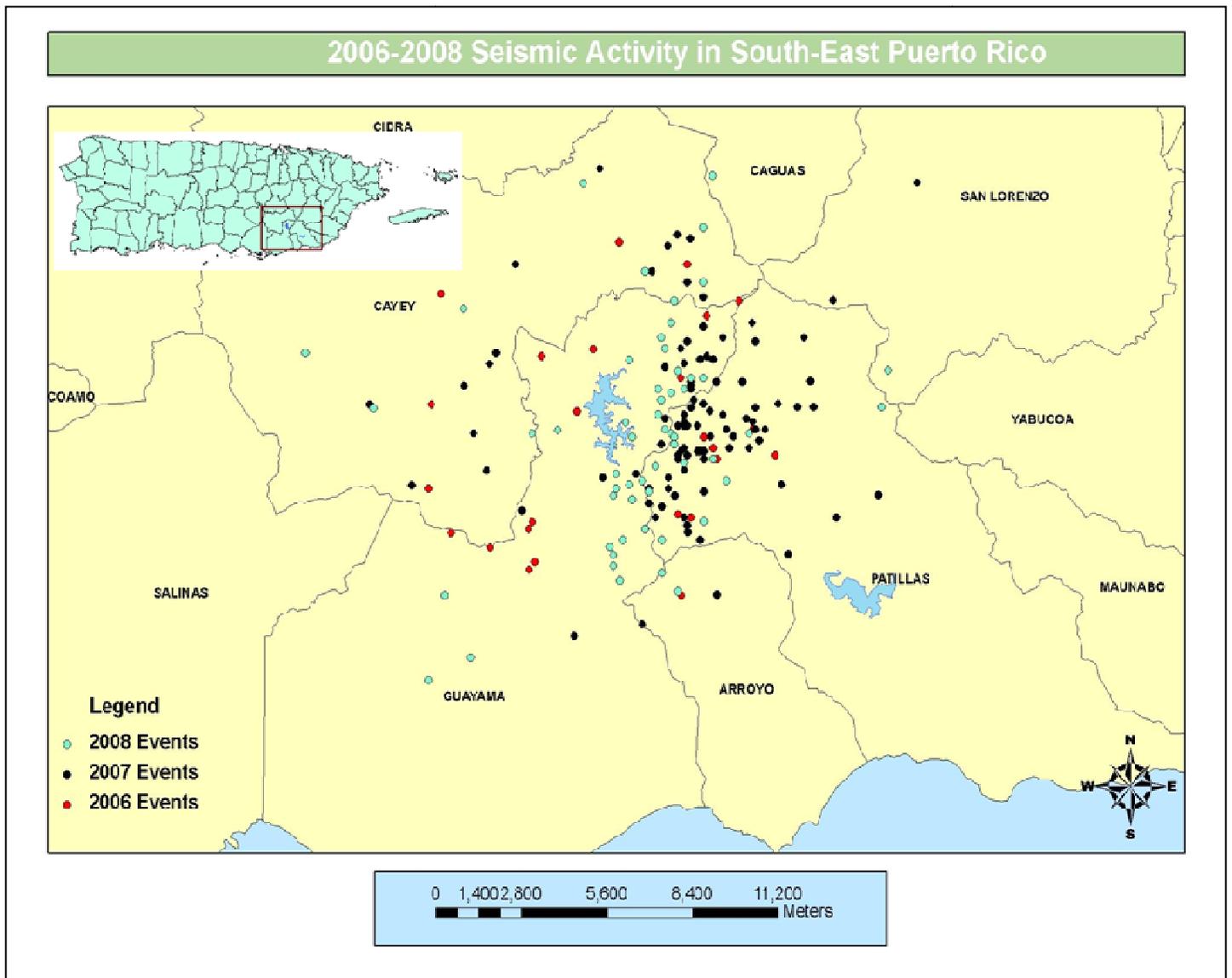


Figura 1. Localización del área de microsismicidad que afecta la región sur-este de

Los cambios observados incluyen:

1. ***Aumento de aproximadamente un 200% en sismicidad***

Las localizaciones de temblores realizadas por la Red Sísmica de Puerto Rico (RSPR) durante el periodo del 1986 al 2005 muestra al área bajo estudio como una zona de baja y escasa sismicidad, con un total de 89 microsismos en 20 años (un promedio de 4 eventos por año; Figura 2). Sin embargo, durante el periodo de Enero 2006 a Agosto 31, 2008 la RSPR ha localizado 173 temblores en dicha área; lo cual constituye un aumento de 194% en sismicidad en comparación con los 4 eventos promedio por año durante el periodo de 1986-2005.

Resulta importante señalar que una cantidad mayor de eventos han sido registrados en la estación más cercana al área de estudio (SJG), particularmente durante periodos de enjambres sísmicos, los cuales no fueron localizados dado la falta de suficientes tiempos de arribo (no fueron registrados en otras estaciones). Por ejemplo, durante el enjambre ocurrido entre el 7 y el 18 de marzo de 2007, la RSPR localizó 33 eventos de los 129 que fueron registrados en la estación SJG. Consecuentemente el porcentaje de aumento en la sismicidad es mucho mayor. Este aumento no está relacionado con modificaciones en la cobertura de las estaciones ni a cambios en los programas de detección de sismos. Durante las pasadas décadas la cantidad y distribución de las estaciones se ha mantenido constante con respecto al área bajo estudio.

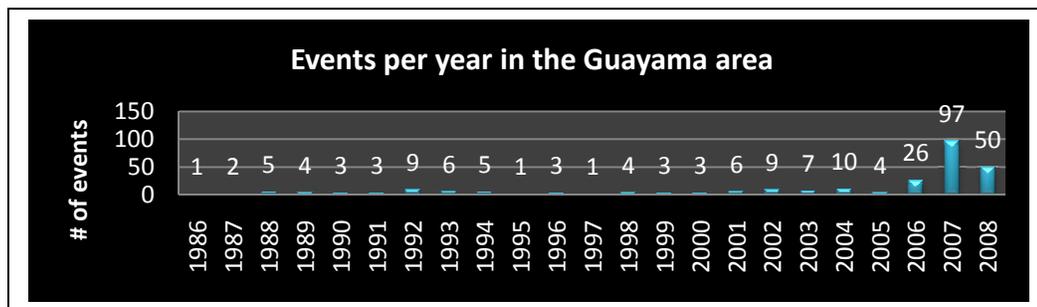


Figura 2. Histograma de profundidad muestra aumento en actividad sísmica

2. ***Temblores superficiales:*** Los eventos ocurren mayormente entre las profundidades de 4.0 y 8.0 Km (Figura 3). Dado que la sismicidad es superficial, se espera que el movimiento de la superficie sea más fuerte, por lo que el riesgo sísmico aumenta. Por este motivo eventos con magnitudes tan pequeñas como 2.3 fueron reportados como sentidos por residentes de Guayama.

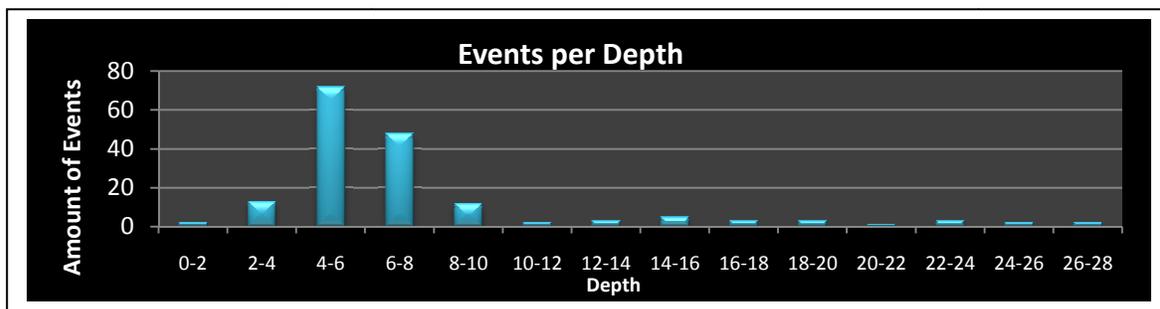


Figura 3. Distribución de profundidad de la microsismicidad.

3. **Actividad en forma de enjambres:** La secuencia de sismicidad incluye enjambres, entiéndase que muchos temblores ocurren en el mismo lugar durante un periodo corto de tiempo. En el área bajo estudio se han registrado enjambres en Marzo 2007 y Mayo 2008 respectivamente.
4. **Eventos sentidos:** Durante 2007-2008 se han sentido **diecinueve (19)** de los eventos ocurridos en el área bajo estudio según reportes de los residentes de los pueblos donde se concentra la sismicidad y en pueblos vecinos. La intensidad máxima reportada ha sido de V en la Escala Mercalli Modificada. Los efectos de un evento con intensidad V incluye: sentido por casi todo el mundo; muchos se despiertan. Algunos platos, ventanas, etc. se rompen; algunas casas de mampostería se agrietan. Objetos inestables volcados. Los péndulos de los relojes se detienen. Las puertas se balancean, se cierran, se abren. Árboles, arbustos sacudidos visiblemente.

Event	Felt in	Structural Damage	Maximum Intensity (MM)	Magnitude (Fmag)	Depth (Km)
2007_03_07 06:11:50	Guayama, Patillas, Arroyo, Cayey, Cidra	None	IV	3.0	7.4
2007_03_07 17:10:49	Guayama	None	III	2.3	5.9
2007_03_08 03:04:38	Guayama	None	IV	2.4	4.7
2007_03_11 09:14:17	Guayama, Patillas	None	IV	2.7	7.0
2007_03_11 04:41:30	Guayama	None	IV	3.0	7.0
2007_03_15 10:16:41	Guayama	None	III	2.5	4.3
2007_04_10 03:35:30	Guayama	None	IV	3.0	7.6
2007_04_10 07:26:54	Guayama	None	IV	2.8	8.1
2007_04_10 15:38:03	Guayama	None	III	2.2	5.5
2007_07_05 20:32:14	Guayama	None	III	2.8	8.4
2007_09_16 04:17:53	Guayama	None	II	2.9	7.9
2008_04_15 02:34:50	Guayama	None	II	2.7	6.4
2008_05_05 16:45:36	Guayama	None	III	2.4	6.6
2008_05_06 21:05:51	Guayama, Cayey	None	V	2.7	8.0
2008_05_06 22:29:05	Guayama, Cayey	None	IV	2.7	8.1
2008_05_14 18:04:54	Guayama	None	III	2.3	17.5
2008_05_14 20:47:53	Guayama	None	II	2.8	7.2
2008_05_15 04:48:18	Guayama, Cayey	None	IV	3.0	5.6
2008_05_15 05:28:56	Guayama	None	II	2.3	5.9

Tabla 1. Resumen de los eventos sentidos según reportados por

El mapa de movimiento fuerte teórico o “shakemap” para el evento sentido de mayor magnitud muestra una distribución de intensidades (II-IV) para toda la Región Sur-Este de la Isla de Puerto Rico (Figura 4).

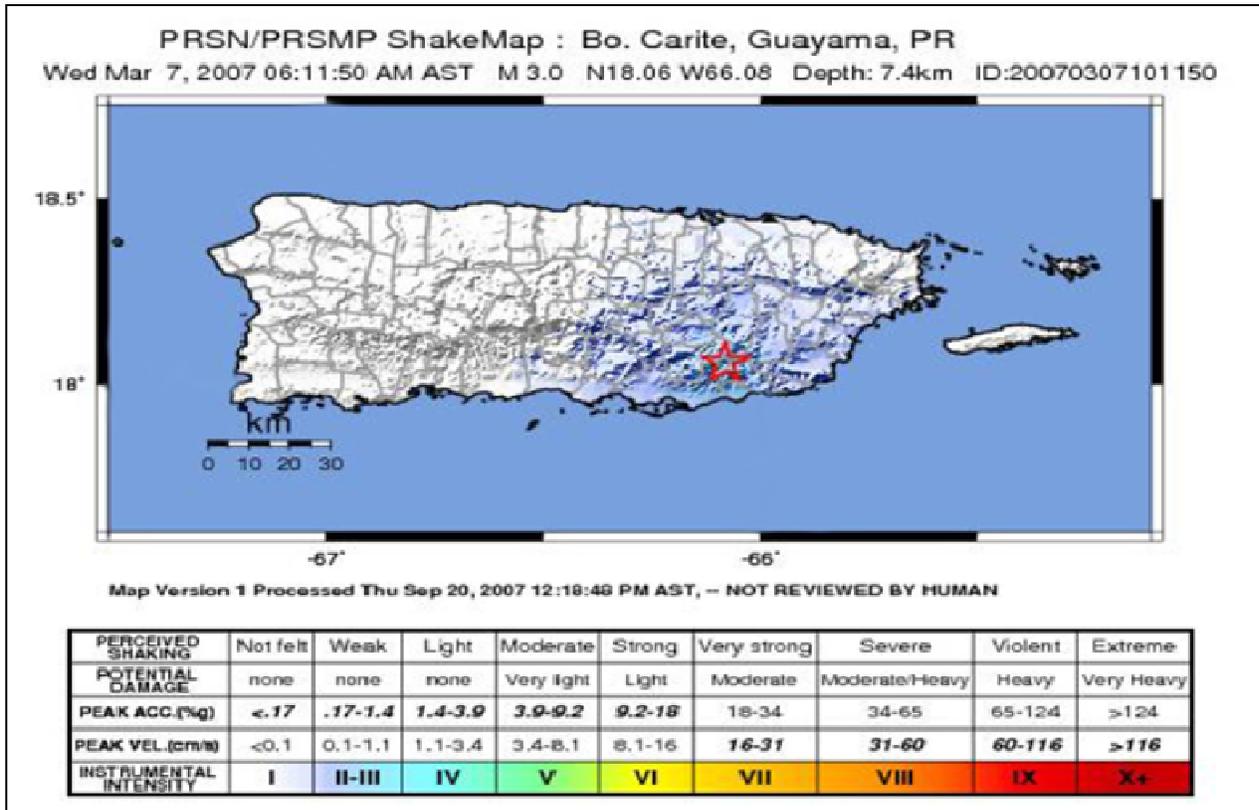


Figure 4. Mapa de Movimiento Fuerte o “ShakeMap” Teórico para el evento de mayor magnitud en la región.

II. Importancia

Es de suma importancia estudiar y entender los procesos sísmológicos, geológicos y tectónicos que afectan el área bajo consideración debido al posible impacto que estos procesos pueden tener sobre la infraestructura local y regional y en la vida y propiedad de los residentes de dichos pueblos. En el área bajo estudio encontramos aspectos particulares e importantes a considerar:

1. **Cercanía a la Represa del Lago Carite:** La sismicidad se concentra al este del Lago Carite y orientándose en una dirección N-NE a S-SO. El Lago Carite es un lago artificial construido en 1913 y formado por una represa de tierra en el Río La Plata. Se utiliza como fuente de agua potable, irrigación y actividades recreativas. Es importante entender la relación y posible impacto de la sismicidad sobre esta estructura.
2. **Cercanía a áreas pobladas:** Los epicentros cubren las regiones montañosas de Arroyo, Cayey, Guayama y Patillas. El área de sismicidad ubica aproximadamente 5 a 8 km de las zonas más pobladas en cada pueblo. El nivel de población en los cuatro pueblos que comprenden nuestra área de estudio alcanza los *130,000 habitantes*.

Ya que la sismicidad es bastante superficial (4-10 km) durante temblores localizados en esa zona el movimiento del suelo será más fuerte y por consecuencia el riesgo de daños aumenta. Es por este motivo que eventos con magnitudes tan bajas como 2.3 han sido reportados como sentidos por los residentes de Guayama.

3. **Temblores ocurren en área susceptible a deslizamientos:** El 21 de septiembre de 2008, el área bajo estudio fue afectada por lluvias torrenciales asociadas a una tormenta tropical. Los efectos de este fenómeno atmosférico fueron tan considerables que esta zona y otros pueblos limítrofes fueron declarados por el presidente de Estados Unidos como *Zona de Desastre*. El daño significativo a la infraestructura fue causado en gran parte por deslizamientos. La susceptibilidad a derrumbes presenta una preocupación adicional con respecto a la sismicidad local particularmente en lo que respecta al riesgo de que ocurran *derrumbes inducidos por los temblores* (earthquake-induced landslides).
4. **Infraestructura mayor en pueblos circundantes:** Según muestra la Figura 1 la *Represa del Lago Patillas* ubica bastante cerca y hacia el sureste de la microsismicidad. El lago está formado por una represa de tierra de 127 pies de alto en el Río Grande de Patillas que fue construida entre el 1910 y 1914. Sus aguas se utilizan para irrigación y consumo humano.
Hacia el oeste-suroeste de nuestra área de estudio, en el pueblo de Salinas, encontramos el *Complejo de la Planta Eléctrica de Aguirre* (plantas termoeléctrica y de ciclo combinado). Esta planta genera el 50% de la energía utilizada en Puerto Rico. Según muestra el Mapa de Movimiento Fuerte o “ShakeMap” Teórico (Figura 4) se espera que un evento en el área de estudio con una magnitud tan pequeña como de 3.0 sea sentido en Salinas.
5. **Análisis de riesgo sísmico potencial del área:** Cuando se conocen los parámetros de una falla la RSPR puede generar mapas de movimiento fuerte para el terremoto de magnitud máxima que puede ocasionar esa falla (escenario). El mapa de movimiento fuerte es una herramienta que provee a los *oficiales de manejo de emergencia* y la ciudadanía una representación de los efectos, desde leves a severos, ocasionados en una región específica por un determinado sismo. De esta manera el gobierno puede prepararse de manera preventiva para cuando ocurra el terremoto. En el caso del área bajo estudio no conocemos en detalle y con precisión los parámetros de la(s) falla(s), lo cual limita se pueda generar un mapa de movimiento fuerte-escenario para el área bajo estudio.
6. **Posible control geológico de la sismicidad-** Hemos observado que la sismicidad aparenta parar en el área del contacto con el Batolito de San Lorenzo (roca ígnea cristalina). Los temblores parecen estar confinados al material volcánico, el cual es menos competente (Figura 5). Entendemos que es gran importancia entender la geología de esa área (al considerar además la susceptibilidad a deslizamientos) y su relación con los temblores que han estado ocurriendo. Sin embargo, no existe un mapa geológico oficial para el área de estudio.

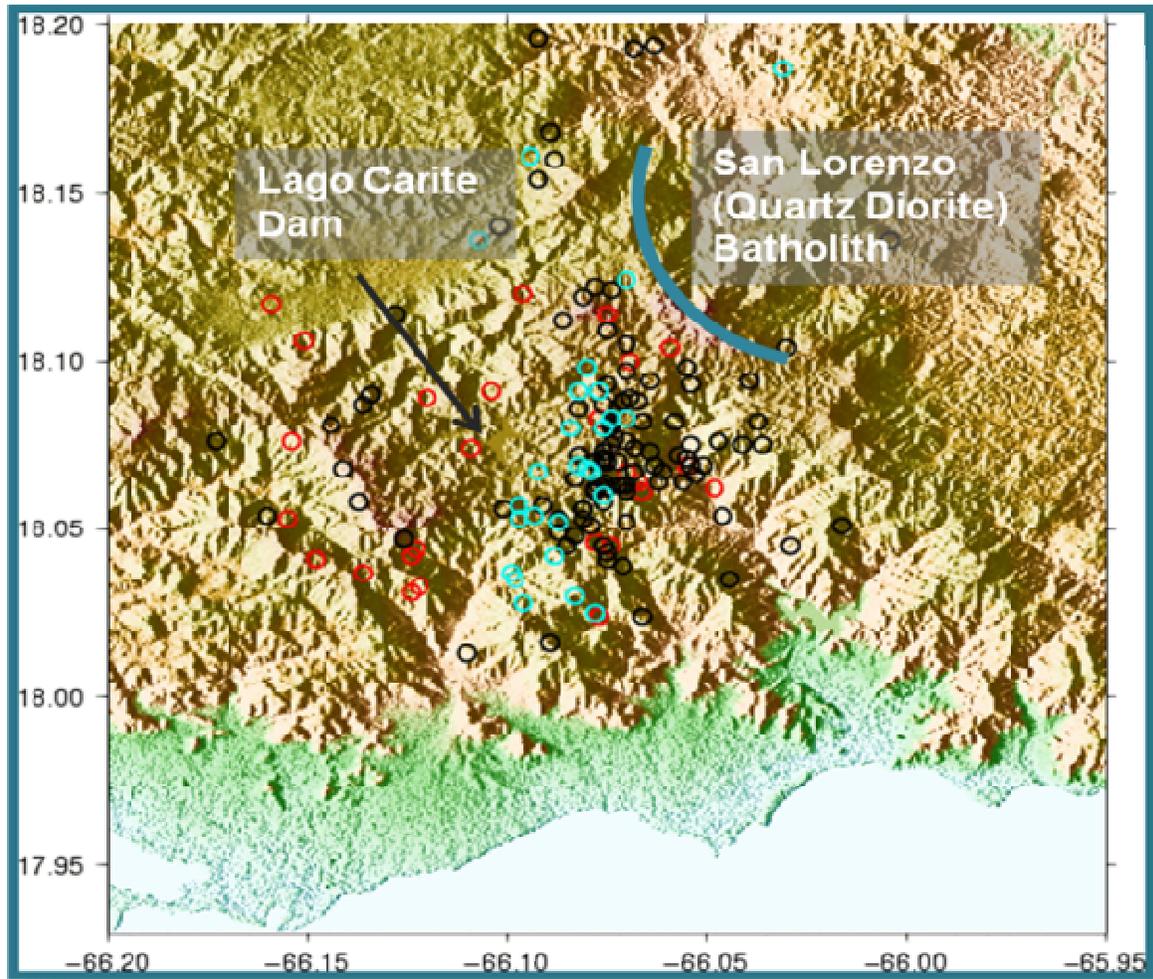


Figura 5. Localizaciones de 181 temblores ocurridos entre 2006-2008 en el área bajo estudio:

- (rojo) 2006 → distribución dispersa
- (negro) 2007 → se alinea en una dirección N-NE a S-SO → al este del Lago Carite
- (azul) 2008 → localizan paralelos y hacia el este de la secuencia de temblores del 2007

III. Características de la sismicidad

Las localizaciones de 174 microsismos que ocurrieron en el área de estudio del 2006 al 2008 tienen errores promedio horizontal y vertical de 3.31 y 2.43 km respectivamente (Calidad C y D). Según mencionamos previamente un número mayor de eventos fueron identificados en la estación SJG (mas cercana al área de sismicidad) pero no pudieron ser identificados debido a la falta de suficientes tiempos de arribo. Las localizaciones epicentrales se concentraron cerca de las latitudes 18.02°N & 18.12°N y las longitudes 66.1°W y 66.05°W . Según muestra la figura 5 la sismicidad se puede describir como:

- Eventos ocurridos durante el año 2006 (rojo) tienen una distribución epicentral dispersa y escasa
- Microsismos del 2007 (negro) tiende a alinearse al Este del Lago Carite en dirección N-NE y S-SO
- Eventos del 2008 (azul) tiende a ubicar en forma paralela y hacia el este de la secuencia del 2007

También se observa que la sismicidad se detiene en el contacto con el Batolito de San Lorenzo y aparenta estar confinada al material menos competente, en este caso material volcánico.

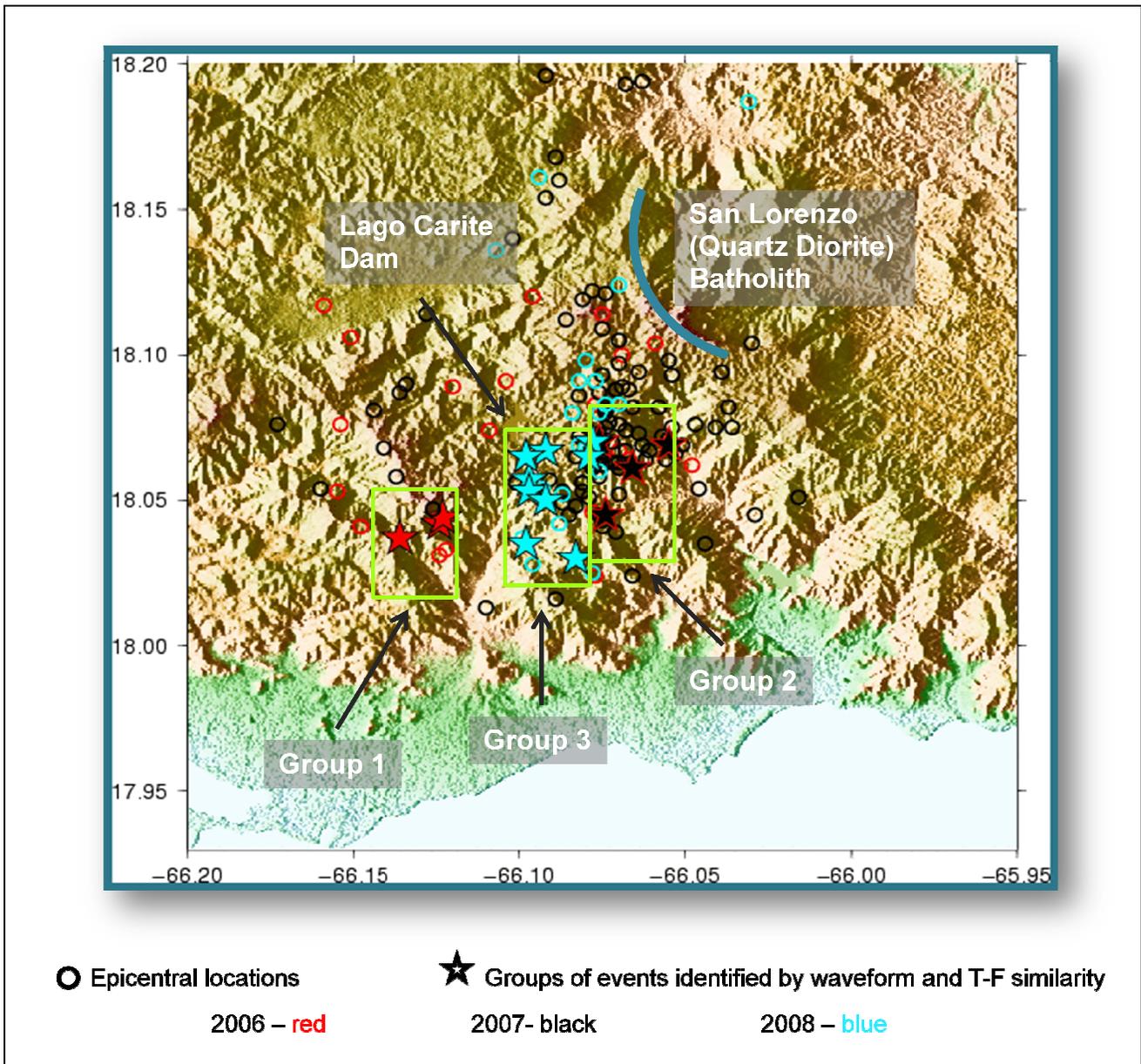


Figura 6. Microsismicidad en el Sur-Este de Puerto Rico. Se observa migración de eventos de enjambres. Agrupación de microsismos conforme a análisis preliminar de formas de onda y tiempo frecuencia para datos de la estación SJG.

Con el propósito de delimitar mejor el área de sismicidad y para determinar los parámetros de la falla y los patrones de estrés en el área realizamos una evaluación preliminar para evaluar la efectividad de usar las técnicas de Correlación Cruzada de Formas de Onda y Análisis en Tiempo-Frecuencia como parte de nuestra investigación. Nuestro análisis preliminar de los datos de la estación más cercana al área de estudio, SJG, utilizando dichas técnicas sugiere que por lo menos dos sistemas de fallas (Grupo 1 y Grupo 2 & 3) podrían estar presentes en el área de estudio (Figura 6).

Además se determinó los mecanismos focales para los eventos con magnitud mayor o igual a 2.5. Las localizaciones de 35 eventos fueron refinadas al re-picar y utilizar solamente las fases de mejor calidad (pesos 0 y 1). Los mecanismos focales fueron determinados para eventos con la mayor cantidad de fases y la mejor distribución de estaciones. Los resultados sugieren que el área bajo estudio está siendo afectada por un proceso de extensión.

Según muestra la Figura 7 logramos identificar dos (2) áreas de fallas normales. En la primera área, la cual ubica al suroeste de los enjambres, los mecanismos focales muestran dos temblores de fallamiento normal orientados NNE-SSO. Las soluciones de los planos de falla para los eventos en la segunda área, relacionados con la actividad de enjambres del 2007-2008, también sugieren un patrón de estrés de fallamiento normal con un componente horizontal.

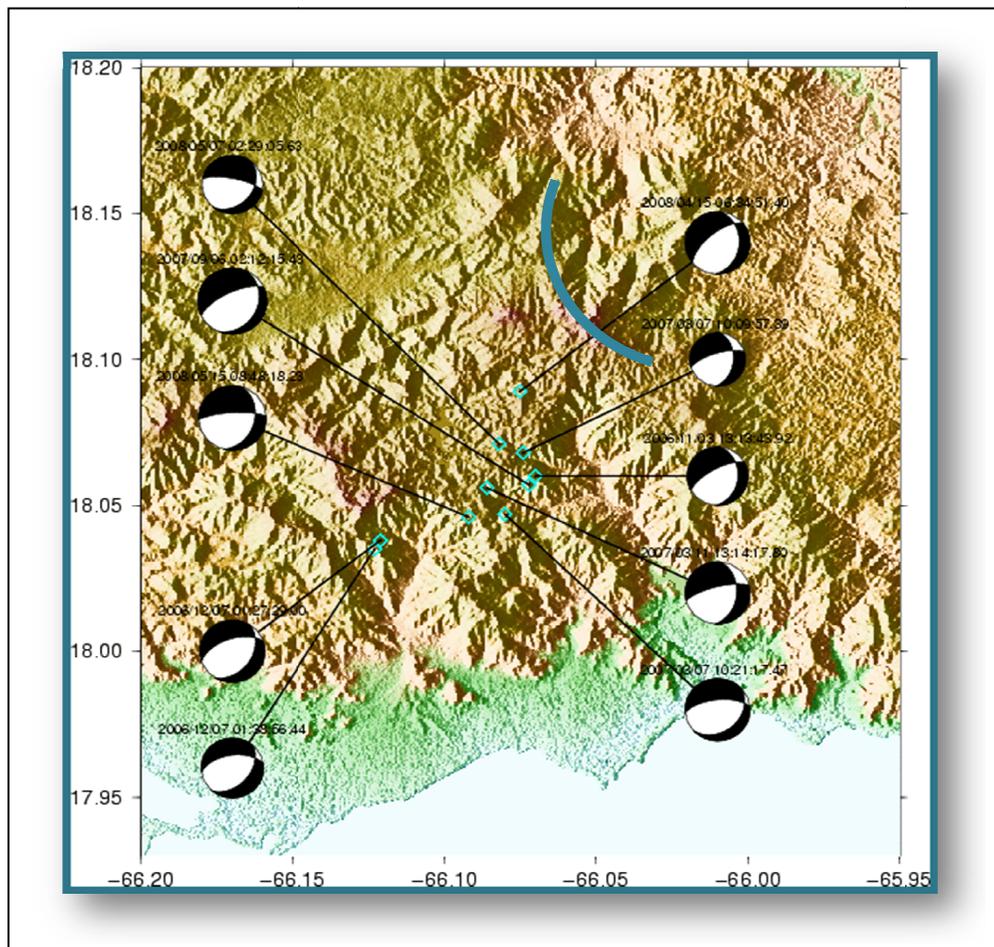


Figura 7. Mecanismos focales sugieren que el área bajo estudio está experimentando extensión.

IV. Limitaciones actuales en la Detección, Monitoreo y Análisis

Hemos identificado varios aspectos que están limitando la capacidad de la Red Sísmica de Puerto Rico para proveer un monitoreo y evaluación de la sismicidad detallada y exhaustiva.

1. Cobertura limitada de estaciones sísmicas: La estación más cercana al área de sismicidad, SJG, ubica alrededor de 13 km al noroeste de la misma seguida por CPD 20 km hacia el este. Según mencionado previamente hemos identificado una cantidad de eventos detectados en la estación SJG, particularmente durante periodos de enjambres, los cuales no fue posible localizar debido a la falta de suficientes tiempos de arribo (solo se detectaron en SJG). Por ejemplo, durante el enjambre sísmico del 7 al 18 de marzo de 2007, la RSPR solo pudo localizar 33 eventos del total de 129 eventos detectados en la estación SJG. Consecuentemente, **la RSPR solo pudo localizar 26% de la cantidad total de eventos** que ocurrieron en nuestra área de estudio para ese periodo de tiempo.

Además, la limitada cobertura acimutal de estaciones con respecto al área bajo estudio aumenta la incertidumbre (errores) de nuestras localizaciones y mecanismos focales. Los arcos negros en la Figura 8 muestra la extensión de la distribución acimutal para la cual la RSPR no tiene cobertura de estaciones con respecto al área de sismicidad.

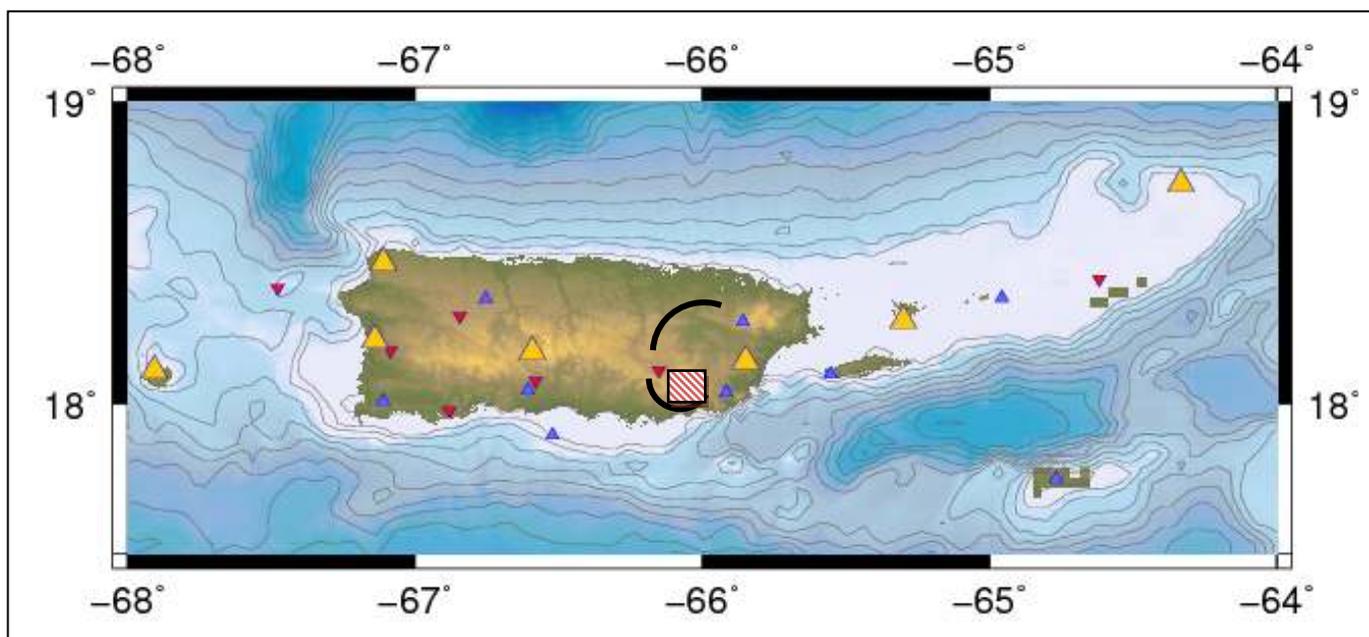


Figura 8. Estaciones sísmicas de la RSPR: instrumentos banda ancha (amarillo), periodo intermedio (violeta) y periodo corto (rojo). Nuestra área de estudio está representada por el rectángulo. Los arcos negros muestran la distribución acimutal, con respecto al área de sismicidad, para la cual la RSPR no tiene cobertura de estaciones.

2. Evaluación de Movimiento Fuerte: Según mencionado previamente el mapa teórico de movimiento fuerte para el evento de mayor magnitud en el área bajo consideración muestra una distribución de intensidades (II-IV) para toda la región sureste de la Isla de Puerto Rico (Figura 4). Esta herramienta ayuda a diseminar información sobre la distribución geográfica del movimiento del terreno asociado a un evento sísmico sentido por la ciudadanía. Además se

puede utilizar para dirigir a los oficiales de seguridad y de manejo de emergencias hacia las áreas de mayor daño potencial.

El uso de datos de acelerómetros, bastante limitados en el área de estudio, podría ayudar a validar, ajustar y mejorar los resultados teóricos y a mejorar nuestro entendimiento y evaluación de la atenuación de las ondas sísmicas en esta área. La adquisición y análisis de datos de movimiento fuerte es de interés y necesidad especial debido a la presencia de importantes facilidades de infraestructura en esta región (refiérase a la sección II). Según se indicó previamente, actualmente no conocemos en detalle y con precisión los parámetros de la(s) falla(s) presentes.

Sin embargo podemos presentar el siguiente ejemplo: si el área sísmicamente activa tuviera el potencial de generar un terremoto de magnitud 6.0 nuestros modelos teóricos predicen que éste sería sentido a través de todo Puerto Rico e Islas Vírgenes Británicas y Estadounidenses (Figura 9). Basado en nuestros resultados teóricos, se espera que hasta pueblos fuera del área de sismicidad, como Salinas, donde ubica la Planta Aguirre de Energía Termoeléctrica, experimenten dicho evento sísmico con una intensidad de VI.

Este ejemplo muestra la importancia de que podamos validar nuestros modelos teóricos con el uso e incorporación de datos de movimiento fuerte (acelerómetros).

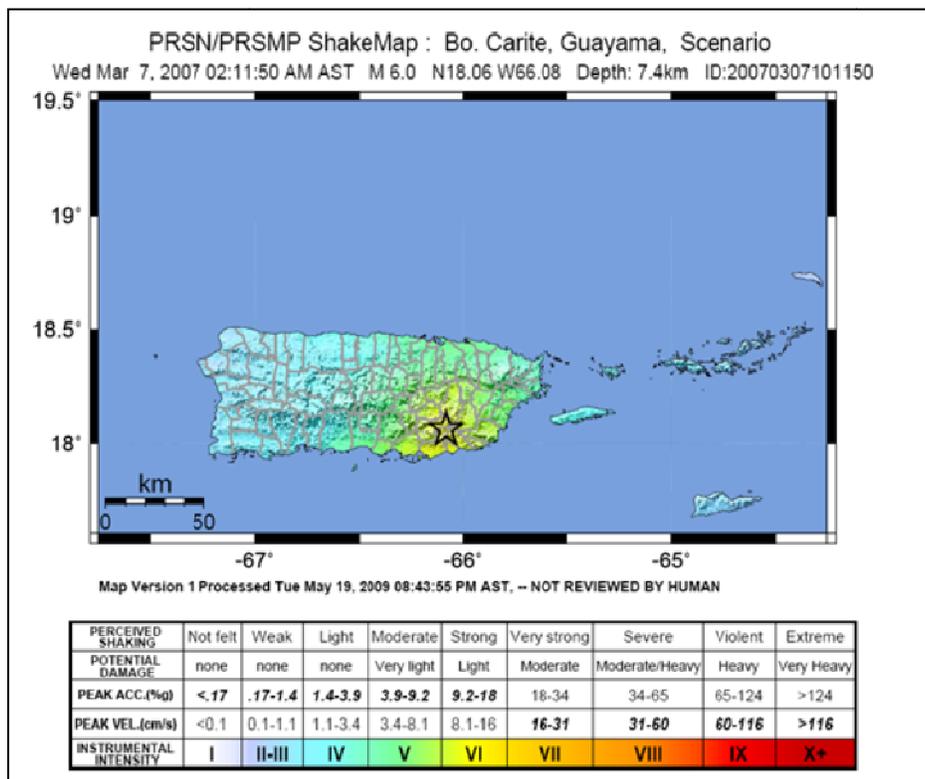


Figura 9. El mapa “escenario” muestra los efectos que tendría un evento de magnitud 6 en el área bajo estudio. Dicho evento sería sentido en toda la Isla, Vieques, Culebra e Islas Vírgenes. En el área bajo estudio el terremoto se sentiría con una intensidad máxima de VI lo cual implica que sería difícil andar, las ventanas, platos y objetos de vidrio se rompen y se caen algunas casas de mampostería.

3. Movimiento Lento: El desplazamiento no-sísmico o movimiento lento de la falla (aseismic slip or fault creep) tiende a liberar estrés que no puede ser asociado con un evento sísmico específico (desplazamiento co-sísmico). Resulta importante señalar que áreas donde ocurren enjambres sísmicos, como es el caso del área bajo estudio, suelen experimentar desplazamientos lentos del terreno durante periodos de inactividad sísmica. Por lo que datos de GPS de respuesta rápida son necesarios para poder atender y evaluar aspectos y preocupaciones de riesgo sísmico. Esta información es además crítica para poder medir el movimiento co-sísmico durante periodos de enjambres sísmicos.

Durante los pasados años, la RSPR se ha esforzado para establecer una red de estaciones de GPS permanentes (Figura 10) en nuestra área de responsabilidad, la cual incluye los archipiélagos de Puerto Rico y las Islas Vírgenes Británicas y Estadounidenses. Esto con el propósito de incorporar estas estaciones en el sistema de vigilancia en tiempo real y respuesta temprana de terremotos y tsunamis. Según muestra la Figura 10, la RSPR no posee instrumentación de GPS en la región sureste de la Isla. Consecuentemente nuestra capacidad para detectar y/o monitorear desplazamiento no-sísmico en el área de estudio es limitada.

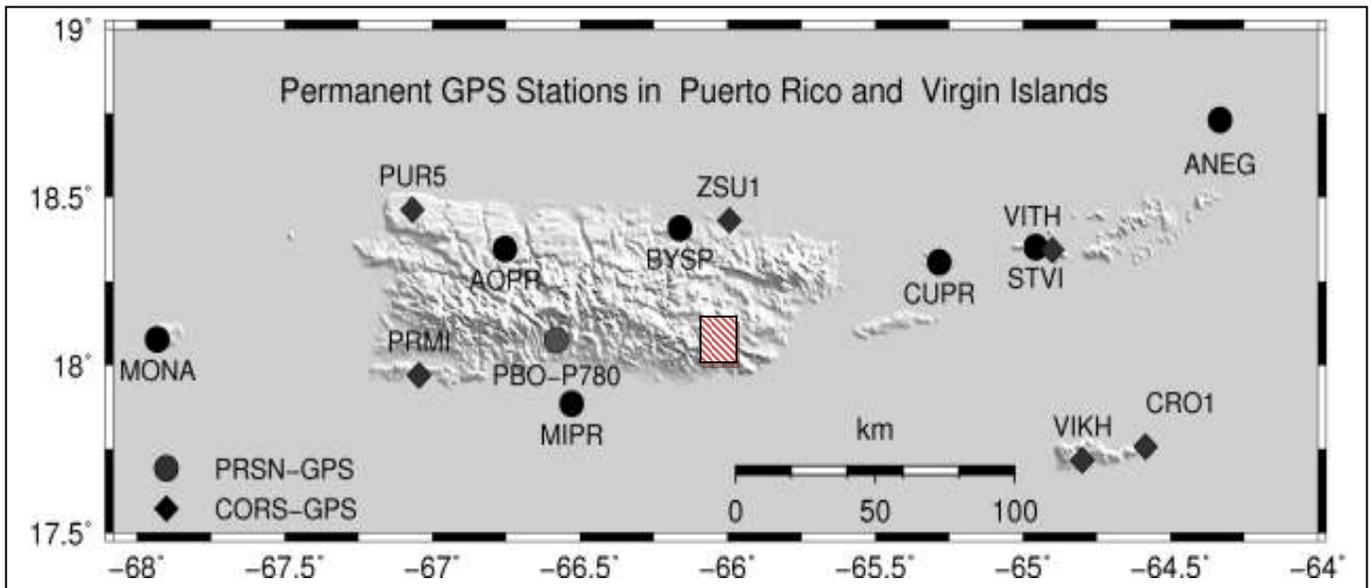


Figura 10. Distribución de estaciones permanentes de GPS de la RSPR. La region sureste de Puerto Rico no posee ninguna estación permanente de GPS. El rectángulo con líneas diagonales indica el area bajo estudio.

V. Conclusiones

Nuestra evaluación preliminar revela:

1. La microsismicidad en el área de estudio ocurre mayormente a profundidades de 4 a 8 km.
2. La actividad sísmica aparenta estar confinada al material menos competente (volcaniclástico) mientras que el Batolito de San Lorenzo aparenta estar controlando la extensión de la sismicidad hacia el norte.

3. Se observa migración de los eventos de enjambres sísmicos.
4. El área de estudio está experimentando un proceso de extensión caracterizado por la presencia de fallas normales con un componente lateral orientadas en dirección NNE-SSO.
5. Análisis preliminar de Formas de Onda y en Tiempo-Frecuencia sugiere dos (2) sistemas de fallas normales presentes en el área de estudio.
6. El uso de técnicas de Correlación Cruzada de Formas de Onda y de Tiempo-Frecuencia podrían ser de gran uso para analizar más detalladamente la sismicidad del área.

VI. Trabajo Futuro

Actualmente hemos sometido varias propuestas a entidades estatales y federales con el propósito de continuar monitoreando y evaluando la sismicidad en esta región. Procedemos a presentar los objetivos de nuestros esfuerzos investigativos futuros y los métodos y técnicas que utilizaremos para alcanzar los mismos:

Objetivo A: Definir mejor el área de sismicidad, determinar los parámetros de las fallas y la distribución estrés en la zona:

Técnicas:

- Correlación cruzada de Formas de Onda y Análisis de Tiempo-Frecuencia de todos nuestros datos.
- Técnica de alta precisión para la relocalización de temblores → para reducir los errores de localización
- Técnica de amplitud S/P para definir mejor los mecanismos focales

Objetivo B: Para evaluar el movimiento fuerte y riesgo sísmico para área de estudio

Técnicas:

- Mapa de Movimiento Fuerte Instrumental para eventos de enjambre y compara con los reportes de eventos sentidos
- Escenario de ShakeMap Mapa de Movimiento Fuerte basado en los parámetros de la falla a ser determinados

Objetivo C: Evaluar el rol e impacto potencial que puede tener la geología local en la sismicidad del área.

Técnicas:

- Métodos tradicionales de realizar mapas y análisis geológicos (trabajo de campo, interpretación de fotos aéreas, análisis geoquímico y petrológico) e integración con las aplicaciones de GIS

Objetivo D: Mejorar la detección y vigilancia geofísica

Técnicas:

- Adquisición, instalación y mantenimiento de instrumentos sísmicos, de movimiento fuerte y GPS.
- Análisis e interpretación de datos geodésicos.

VII. Referencias

- Benetatos, C., A. Kiratzi, K. Kementzetzidou, Z. Roumelioti, G. Karakaisis, E. Scordilis, I. Latousakkis, and G. Drakatos, 2004. The Psachna (Evia Island) earthquake swarm of June 2003. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, vol XXXVI, 2004.
- Clinton, J., Cua, G., Huérfano, V., von Hillebrandt-Andrade, C., Martínez Cruzado, J., 2006.

- The current state of seismic monitoring in Puerto Rico. *Seismological Research Letters*, pp. 532-543.
- Combrinck, W. L., and M. Schmidt, 1998. Physical site specifications Geodetic Site monumentation. IGS Network Systems Workshop, Position Paper.
- Jansma, P.E., and G. S. Mattioli, 2005. GPS results from Puerto Rico and the Virgin Islands: Constraints on tectonics setting and rates of active faulting. *Geological Society of America Special Paper* 385, pp. 13-30.
- Huérfino, V., 1994. Modelo de corteza y mecánica del bloque de Puerto Rico. Master Thesis.
- Huérfino, V., von Hillebrandt-Andrade, C. G., Báez, G., 2004. Microseismic Activity Reveals Two Stress Regimes in Southwestern Puerto Rico, in Paul Mann, ed., *GSA Special Paper* 385, Active Tectonics and Seismic Hazards of Puerto Rico, Virgin Islands and Offshore Areas, pp. 81-101.
- Huérfino, V., G. Cua, A. Saffar, and C. von Hillebrandt, 2008. Introducing Shakemap to potential users in Puerto Rico using scenarios of damage historical and probable earthquakes. Final Technical Report, USGS, grant : 06HQGR0194.
- Mendoza, C., and V. Huerfano, 2005. Earthquake location accuracy in the Puerto Rico- Virgin Islands Region. *Seismological Research Letters*, 76, 356363.
- Mueller, C. S., A. D. Frankel, M. D. Petersen, and E. V. Leyendecker, 2003. Documentation for 2003 USGS Seismic Hazard Maps for Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands.
- Odum, J. K., R. A. Williams, W. J. Stephenson, C. von Hillebrandt, E. Asencio and A. Cameron, 2007. Near-surface Shear Wave velocity versus depth profile interpretations, Vs30, and NEHRP classifications from active and Passive-source surveys at 27 sites in Puerto Rico, Open-File Report 2007-1174, 47 pp.
- von Hillebrandt, C., and V. Huérfino, 2006. Emergent tsunami warning system for Puerto Rico and the Virgin Islands, in Caribbean Tsunami Hazard, A. Mercado-Irizarry and P. Liu, eds., World Scientific, pp. 231-243.
- Wang, G., C. von Hillebrandt-Andrade, J. Martinez Cruzado, V. Huérfino, J. Schellekens, 2008. Introduction to the High-Rate GPS Network of Puerto Rico and U. S. Virgin Islands, Abstract, Fall AGU, San Francisco.
- Wendt, J., and R. Dietrich, 2003. Determination of recent crustal deformations based on precise GPS measurements in the Vogtland earthquake area. *Journal of Geodynamics*, pp. 235-246.