La duración potencial de las réplicas del terremoto 2020 del suroeste de Puerto Rico

Informe de Archivo Abierto 2020–1009

Departamento del Interior de los EE.UU.
Servicio Geológico de los EE.UU.

Figuras de la portada. Mapa de la secuencia del suroeste de Puerto Rico en el 2020. Cada sismo desde el 29 de diciembre de 2019 hasta el final de 22 de enero de 2020 (UTC), está graficado como un círculo mostrando la localización en el mapa. Los sismos previos al sismo de magnitud 5.0 el 29 de diciembre de 2019 están graficados en verde. El sismo de magnitud 5.0 el 29 de diciembre de 2019 y sus réplicas están graficados en azul. El sismo de magnitud 5.8 el 6 de enero de 2020 y sus réplicas están graficados en anaranjado. Finalmente, el sismo de magnitud 6.4 el 7 de enero de 2020 y sus réplicas están graficados en rojo. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de cada sismo.

Trasfondo de la portada. Juan Carlo del USGS y Jaffet Martínez del Programa de Movimiento Fuerte de Puerto Rico descargando datos y programando la instrumentación sismológica en la Estación de Bomberos, Maricao. Fotografía del Servicio Geológico de los EE.UU. por James Smith.

La duración potencial de réplicas del terremoto de 2020 del suroeste de Puerto Rico

Por Nicholas J. van der Elst, Jeanne L. Hardebeck, and Andrew J. Michael

Informe de Archivo Abierto 2020–1009

Departamento del Interior de los EE.UU.
Servicio Geológico de los EE.UU.

Departamento del Interior de EE. UU.
DAVID BERNHARDT, Secretario

Servicio Geológico de los EE. UU. (USGS por sus siglas en inglés)
James F. Reilly II, Director

Servicio Geológico de EE. UU., Reston, Virginia: 2020

Para obtener más información sobre el USGS, la fuente federal de ciencia sobre la Tierra,sus recursos naturales y vivos, los peligros naturales y el medio ambiente: visitehttps://www.usgs.gov/ o llame al 1–888–ASK–USGS (1–888–275–8747).

Para obtener una descripción general de los productos informativos del USGS, incluyendo mapas, imágenes y publicaciones, visite https://store.usgs.gov/.

El uso de nombres comerciales, de empresas o de productos es solo para fines descriptivos y no implica respaldo del gobierno de los EE. UU.

Aunque este producto informativo, en su mayor parte, es de dominio público, también podríacontener materiales con derechos de autor como se indica en el texto. El permiso para reproducir artículos con derechos de autor debe estar asegurado por el propietario de los derechos de autor.

Cita sugerida:
van der Elst, N.J., Hardebeck, J.L., y Michael, A.J., 2020, La duración potencial de las réplicas del terremoto 2020 del suroeste de Puerto Rico: Informe de archivo abierto del Servicio Geológico de los EE. UU. 2020–1009, 5 p., https://doi.org/10.3133/ofr20201009.

ISSN 2238-0328 (online)

Expresiones de gratitud

Este manuscrito se benefició de la revisión de Andrea Llenos, Fred Pollitz, Ruth Harris y Keith Knudsen (U.S.Geological Survey [USGS]). Todos los cálculos en este informe se realizaron utilizando la aplicación de interfaz gráfica de usuario para cálculos de pronóstico de secuencia de réplicas de tipo epidémico desarrollado por Nicholas van der Elst (USGS), Michael Barall (Invisible Software), Ned Field (USGS) y Kevin Milner (SCEC), y con financiamiento parcial para el desarrollo del software de pronóstico de secuencia de réplicas de tipo epidémico de la Agencia para el Desarrollo Internacional de los EE.UU., Oficina para la Asistencia de Desastres Extranjeros.

Los autores reconocen a la Red Sísmica de Puerto Rico en la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez por su rol central en registrar los sismos durante esta secuencia.

Contenido

Resumen....1
Introducción....1
Secuencia de réplicas del terremoto del suroeste de Puerto Rico 2020....1
Modelado de la secuencia de réplicas....3
Conclusiones....4
Referencias....4
Apéndice 1....5

Figuras

1. Mapa y diagrama de magnitud-tiempo de la secuencia de terremotos en el suroeste de Puerto Rico 2020....2

Tablas

1. Terremotos de magnitud 5 y mayores entre el 29 de diciembre de 20191 y el 17 de enero de 2020, registrados en el catálogo integral del Servicio Geológico de los EE.UU. del Sistema Sísmico Nacional Avanzado....2
2. Duración prevista después del 17 de enero de 2020 para sentir terremotos de manera regular....3
3. Tiempo después del 17 de enero de 2020, cuando las probabilidades de una réplica en el próximo año disminuyan a valores dados....3
1.1. Parámetros del modelo y una incertidumbre de desviación estándar utilizada para las estimados en este informe....5

Factores de Conversión

Sistema internacional de unidades a unidades tradicionales de los EE. UU.

Multiplica	Por	Para obtener
metro(m)	3.281	pie (ft)
kilómetro (km)	0.6214	milla (mi)

La temperatura en grados Celsius (° C) se puede convertir a grados Fahrenheit (° F) como

$$°F = (1.8 \times °C) + 32.$$

La temperatura en grados Fahrenheit (° F) se puede convertir a grados Celsius (° C) como ° C

$$°C = (°F - 32) / 1.8.$$

Dato

La información de coordenadas verticales está referenciada al Datum vertical de Puerto Rico de 2002 (PRVD 02).

La información de coordenadas horizontales está referenciada al Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS 84).

Abreviaturas

ETAS	Secuencia de réplicas de tipo epidémico
Km	kilómetro
USGS	Servicio Geológico de los EE.UU. (USGS por sus siglas in inglés)

La duración potencial de las réplicas del terremoto 2020 del suroeste de Puerto Rico

Por Nicholas J. van der Elst, Jeanne L. Hardebeck y Andrew J. Michael

Resumen

Las réplicas (terremotos agrupados espacial y cronológicamente cerca de la ocurrencia de un terremoto causante) están en curso en el suroeste de Puerto Rico después de una serie de terremotos, que incluyen un terremoto de magnitud 6.4, ocurrido cerca del Barrio Indios, Guayanilla, el 7 de enero de 2020 y que afectaron las áreas circundantes. Este informe estima la duración esperada de las réplicas incorporando observaciones de réplicas a partir del 17 de enero de 2020 en un modelo estadístico bien establecido de cómo se comportan las secuencias de terremotos. Las réplicas persistirán durante años o décadas, aunque con una frecuencia decreciente, y los terremotos probablemente se sentirán a diario durante varios meses. Estos estimados tienen una incertidumbre significativa debido a diferentes escenarios de cómo la secuencia del terremoto puede evolucionar con el tiempo y también podrían cambiar si ocurre una nueva réplica grande. Este informe también estima la cantidad de tiempo restante hasta que la probabilidad anual de réplicas de magnitud 5, 6 y 7 o más - que podría causar daños adicionales- disminuya a un 50, 25, 10, 5 y 1 por ciento. Al momento de escribir este artículo, la posibilidad de tener un terremoto de magnitud 6 en un año determinado, en el futuro, no caerá por debajo del 25 por ciento durante otros 3 meses a 3 años. La probabilidad de tener un terremoto de magnitud 5 o mayor no será inferior al 25 por ciento durante una década o más. Las réplicas discutidas en este informe se ubicarían en la misma área general que las réplicas que ya han ocurrido. Nuestros resultados no implican un cambio en el riesgo de terremotos en otras partes de Puerto Rico.

Introducción

Puerto Rico se encuentra donde la placa tectónica del Caribe se une con la placa de América del Norte, con la isla comprimida entre las dos placas. Los terremotos son comunes en Puerto Rico debido a su ubicación geográfica. Los terremotos se comportan de manera diferente a otras amenazas naturales, como inundaciones, huracanes o incendios forestales, ya que las secuencias de terremotos pueden durar semanas, años o décadas, en lugar de ocurrir como un solo evento o temporada. Este informe estima por cuánto tiempo habrá réplicas después de una secuencia de terremotos que comenzaron en la costa suroeste de Puerto Rico en diciembre de 2019.

Las réplicas son terremotos que se desencadenan por terremotos anteriores, y se agrupan en el tiempo y en el espacio alrededor de sus terremotos causales, a menudo llamados terremotos principales. El primer terremoto de magnitud 5 o mayor, en una secuencia que incluye 10 terremotos de esa magnitud o mayor, ocurrió el 28 de diciembre de 2019, zona horaria local (tabla 1). El mayor de ellos ha sido un terremoto de magnitud 6.4 el 7 de enero de 2020. La duración de la secuencia de réplicas se estima utilizando observaciones de la secuencia del terremoto hasta el 17 de enero de 2020. Cambios en el comportamiento de la secuencia de réplicas, incluida la aparición de una nueva réplica grande, podría requerir nuevos estimados.

Mientras que la mayoría de las réplicas son más pequeñas que el terremoto que las causó, este no es siempre el caso, y las réplicas aún tienen el potencial de ser dañinas o mortales. Por ejemplo, el terremoto destructivo de magnitud 6.2 del 2011 en Christchurch, Nueva Zelanda, fue una réplica de un terremoto menos destructivo de magnitud 7.1 en el 2010 en Darfield, Nueva Zelanda, (Kaiser y otros, 2012). Una pequeña fracción de los terremotos es seguida por un terremoto más grande, en cuyo caso el primer terremoto se conoce como un terremoto precursor. Por ejemplo, el terremoto y el tsunami de 2011 de magnitud 9.1 en las fueras de Tohoku, Japón fueron precedidos por un terremoto de magnitud 7.3 dos días antes (Hirose y otros, 2011), y el terremoto de magnitud 7.1 de Ridgecrest, California, de 2019, fue precedido por un terremoto de magnitud 6.4 unas 33 horas antes (Ross y otros, 2019).

Secuencia de réplicas del terremoto del suroeste de Puerto Rico 2020

Las réplicas generalmente se encuentran dentro de un radio de 1 a 2 veces la longitud de ruptura del terremoto principal. Ese radio se puede estimar utilizando relaciones empíricas que estiman la longitud de ruptura en función de la magnitud del terremoto. Para este cálculo, utilizamos las ecuaciones de Wells y Coppersmith (1994). En la secuencia de réplicas del terremoto de 2020 en el suroeste de Puerto Rico, incluimos réplicas dentro de los 33 kilómetros (km) de un punto cerca del epicentro del terremoto de magnitud 6.4 (apéndice 1). Se esperan réplicas futuras dentro o cerca de esta misma área. Estos terremotos son los primeros terremotos

Tabla 1. Terremotos de magnitud 5 y mayores entre el 29 de diciembre de 2019[1] y el 17 de enero de 2020, registrados en el catálogo integral del Servicio Geológico de los EE.UU. del Sistema Sísmico Nacional Avanzado.

Fecha (UTC)	Hora (UTC)	Magnitud	Latitud	Longitud	Profundidad[2], En kilómetros
29 de dic. 2019	01:06:00	5.0	17.885º N	66.864º W	6.0
6 de enero, 2020	10:32:18	5.8	17.867º N	66.819º W	6.0
7 de enero, 2020	08:24:26	6.4	17.916º N	66.813º W	10.0
7 de enero, 2020	08:34:02	5.6	17.922º N	66.731º W	10.0
7 de enero, 2020	08:50:45	5.0	17.953º N	66.677º W	10.0
7 de enero, 2020	11:18:43	5.6	18.022º N	66.776º W	9.0
7 de enero, 2020	22:26:25	5.2	17.935º N	66.883º W	9.0
11 de enero, 2020	12:54:45	5.9	17.949º N	66.851º W	5.0
11 de enero, 2020	12:56:22	5.2	17.824º N	66.795º W	10.0
15 de enero, 2020	15:36:23	5.2	17.916º N	67.017º W	5.0

[1]Horas y fechas en esta tabla se informan en la zona horaria UTC. La hora local durante estos sismos es la Hora Estándar del Atlántico que es 4 horas más temprano que UTC.

[2] Las profundidades están poco restringidas para estos terremotos, que se producen principalmente costa afuera, lejos de los sensores sísmicos.

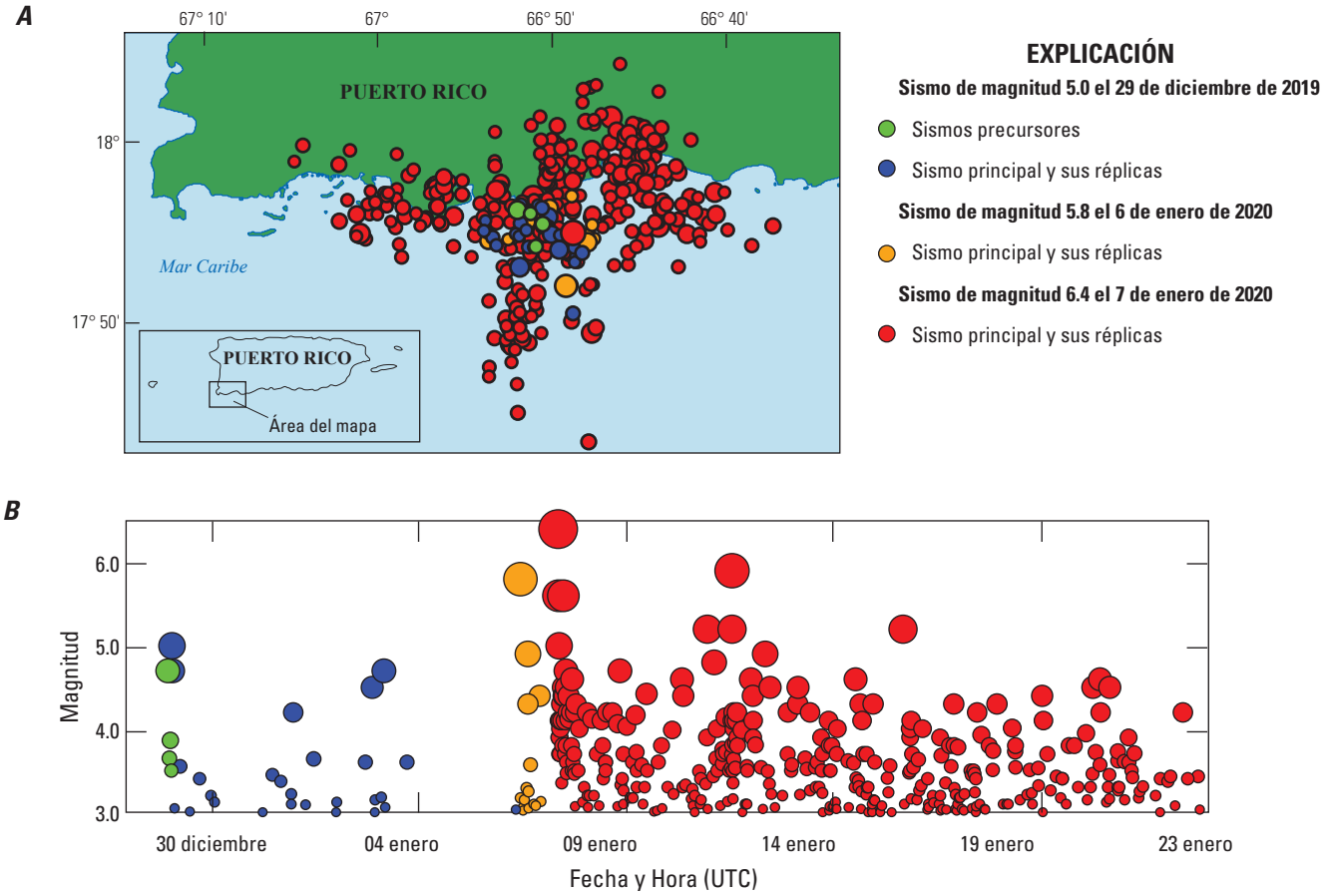

Figura 1. (*A*) Mapa y (*B*) gráfica de magnitud y tiempo para la secuencia del suroeste de Puerto Rico en el 2020. Cada sismo hasta el 29 de diciembre de 2019 hasta el final de 22 de enero de 2020 (UTC), está graficado como un círculo mostrando la localización en el mapa. Solo los sismos desde el 17 de enero de 2020 fueron utilizados para la estimación de los resultados en este informe. El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud de cada sismo.

grandes que se registran con instrumentos sismográficos modernos en esta región de Puerto Rico.

En el tiempo transcurrido entre los primeros terremotos del 28 de diciembre de 2019 hasta 10 días después del terremoto principal del 7 de enero de 2020, han habido más de 260 terremotos de magnitud 3 o más. La mayoría de estos son réplicas del terremoto del 7 de enero. Se espera que la tasa de réplicas disminuya a medida que pasa el tiempo. Las observaciones de secuencias de réplicas en todo el mundo encuentran que la mayoría de las secuencias disminuyen aproximadamente en proporción a 1 / tiempo (Omori, 1894). Por lo tanto, la tasa de réplicas en el décimo día después del terremoto principal es generalmente como 1/10 (10 por ciento) de lo que fue el primer día y la tasa en el día 100 es aproximadamente 1/100 (1 por ciento) de lo que fue el primer día después del terremoto principal. Mientras que la tasa de réplicas en un día determinado disminuye con el tiempo, las réplicas aún pueden representar un riesgo significativo para cada fase del proceso de recuperación de desastres. Esto se debe a que las fases de recuperación de desastres aumentan a medida que la sociedad pasa de la respuesta de emergencia a la restauración de servicios, a la reconstrucción de edificios dañados, a proyectos de mejora y al retorno a la actividad normal a largo plazo (Michael, 2012). Incluso después de que las tasas hayan disminuido, las réplicas individuales conservan el mismo potencial de ser tan grandes y perjudiciales como las que ocurren al principio de la secuencia.

Modelado de la secuencia de réplicas

La disminución del tiempo y la duración de la secuencia de réplicas puede estimarse utilizando un enfoque matemático llamado modelo de secuencia de réplicas de tipo epidémico (ETAS) (Ogata 1988). Este modelo considera no solo el efecto del desencadenamiento principal de las réplicas, sino también el efecto de las réplicas grandes (por ejemplo, las réplicas de magnitud 5 enumeradas en la tabla 1), que pueden causar réplicas propias. En este informe, modelamos el comportamiento de la secuencia hasta 10 años a partir del terremoto principal de magnitud 6.4. La tasa de réplicas puede permanecer elevada más allá de este tiempo, pero necesitaremos un período de observación más largo para calcular el modelo de réplicas por más de una década. Los parámetros del modelo a partir del 17 de enero de 2020 se presentan en el apéndice 1. Para capturar la incertidumbre en el pronóstico, se presentan dos conjuntos de parámetros del modelo ETAS, que juntos dan un límite superior e inferior para nuestras estimaciones de duración de secuencia de réplicas. A medida que pasa más tiempo y se recopilan más datos, puede ser posible refinar estos límites.

A partir del 17 de enero de 2020, los terremotos se han sentido diariamente en el suroeste de Puerto Rico. Usando el modelo de secuencia de réplicas, podemos determinar cuánto tiempo uno puede esperar sentir terremotos a diario, semanal o mensualmente. En la tabla 2 informamos sobre terremotos de magnitud 3 y más grandes, que son comúnmente sentidos por las personas cercanas al epicentro del terremoto (dentro de varias decenas de kilómetros), así como terremotos de magnitud 4 y más grandes, que tienden a sentirse más ampliamente y pueden producir fuertes temblores en la superficie. La Tabla 2 resume los períodos durante los cuales las personas pueden esperar experimentar regularmente estos terremotos pequeños a moderados. Las réplicas continuarán más allá del tiempo en que se sienten mensualmente, pero con menos frecuencia.

Tabla 2. Duración[1] prevista después del 17 de enero de 2020 para sentir terremotos de manera regular[2]

Frecuencia de terremotos	Magnitud 3 o mayor	Magnitud 4 o mayor
Diaro	2–6 meses	5–13 días
Semanal	1.5–10 años	4–16 meses
Mensual	10 o más años	1.5–10 años

[1] Los rangos para los periodos de tiempo se basan en los dos conjuntos de parámetros para la disminución de réplicas (apéndice 1).

[2] Definimos “de manera regular” como tener más de un 50 por ciento de probabilidad de que ocurra un terremoto durante el próximo día, semana o mes.

A continuación, calculamos los tiempos hasta que las probabilidades anuales de réplicas con magnitudes 5, 6 y 7 o mayores disminuyan a un 50, 25, 10, 5 y 1 por ciento. Se eligieron estas magnitudes porque una réplica de magnitud 5 podría causar daños moderados, dependiendo de su ubicación, mientras que una réplica de magnitud 6 podría causar daños considerables. Un terremoto de magnitud 7 en esta región podría causar temblores severos y daños significativos. Los resultados se muestran en la tabla 3. Calculamos que pasarán un mínimo de 3 años (y posiblemente

Tabla 3. Tiempo después del 17 de enero de 2020, cuando las probabilidades de una réplica en el próximo año disminuyan a valores dados[1]

Probabilidad de 1 o más terremotos en el próximo año, en porcentaje	Magnitud 5 o mayor	Magnitud 6 o mayor	Magnitud 7 o mayor
50	3–10 o más años	1–2 semanas	ya por debajo del 50 por ciento
25	9–10 o más años	3–36 meses	ya por debajo del 25 por ciento
10	más de 10 años	2–10 o más años	1–7 dias
5	más de 10 años	5–10 o más años	1–10 meses
1	más de 10 años	más de 10 años	2–10 o más años

[1] Los rangos de los periodos de tiempo se basan en los dos conjuntos de parámetros para la disminución de réplicas (apéndice 1).

más de 10 años) antes de que la probabilidad anual de una réplica de magnitud 5 o mayor caiga por debajo del 50 por ciento. La probabilidad anual de una réplica de magnitud 6 o más tardará solo 1–2 semanas en disminuir por debajo del 50 por ciento, pero la probabilidad anual tardará de 2 a 10 años en caer por debajo del 10 por ciento. Los rangos de tiempo representan los escenarios de límite inferior y superior de cómo la secuencia de réplicas disminuye con el tiempo.

Si se produce una réplica grande (similar en tamaño a la magnitud 6.4 de la terremoto principal) durante el período de tiempo de pronóstico, aumentaría la tasa de réplicas y restablecería el reloj en los cálculos de duración de secuencia de réplicas. Las tablas proporcionadas en este documento tendrían que revisarse. Al momento de escribir este artículo, estimamos que un terremoto de más de magnitud 6.4 tiene una probabilidad de 24 a 30 por ciento de ocurrir en el año posterior al 17 de enero de 2020, y un terremoto de magnitud mayor a 7 tiene una probabilidad de 6 a 10 por ciento de ocurrir en ese mismo periodo de tiempo.

Conclusiones

Las secuencias de terremotos pueden durar semanas, años o décadas. Nuestros modelos sugieren que las réplicas del terremoto de magnitud 6.4 en el suroeste de Puerto Rico disminuirán en frecuencia a medida que pase el tiempo, pero persistirán durante mucho tiempo. Esta secuencia es muy productiva y las probabilidades de rréplicas de magnitud 5 o superior siguen siendo lo suficientemente altas como para justificar preocupación y lo harán por algún tiempo en el futuro. El marco de tiempo cuando estas probabilidades se reducen a niveles más bajos podría usarse para guiar las decisiones de política pública u otras acciones en concierto con consideraciones adicionales. Las réplicas discutidas en este informe se ubicarían en la misma área general que las réplicas que ya han ocurrido. Nuestros resultados no implican un cambio en el riesgo de terremotos en otras partes de Puerto Rico. Los resultados en este informe se basan en el comportamiento actual (a partir del 17 de enero de 2020) de esta secuencia de réplicas y es posible que deba modificarse si ese comportamiento cambia, incluso si ocurre un terremoto más grande.

Referencias

de Arcangelis, L., Godano, C., and Lippiello, E, 2018, The Overlap of Aftershock Coda Waves and Short-Term Postseismic Forecasting: Journal of Geophysical Research, Solid Earth, v. 123, no. 7, p. 5661–5674.

Hirose, F., Miyaoka, K., Hayashimoto, N., Yamazaki, T., and Nakamura, M., 2011, Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M_w 9.0)—Seismicity; foreshocks, mainshock, aftershocks, and induced activity: Earth, Planets, and Space, v. 63, no. 1, p. 513–518, https://doi.org/10.5047/eps.2011.05.019.

Kaiser, A., Holden, C., Beavan, J., Beetham, D., Benites, R., Celentano, A., Collett, D., Cousins, J., Cubrinovski, M., Dellow, G., Denys, P., Fielding, E., Fry, B., Gerstenberger, M., Langridge, R., Massey, C., Motagh, M., Pondard, N., McVerry, G., Ristau, J., Stirling, M., Thomas, J., Uma, S.R., and Zhao, J., 2012, The M_w 6.2 Christchurch earthquake of February 2011—Preliminary report: New Zealand Journal of Geology and Geophysics, v. 55, no. 1, p. 67–90, https://doi.org/10.1080/00288306.2011.641182.

Michael, A.J., 2012, Do aftershock probabilities decay with time?: Seismological Research Letters, v. 83, no. 4, p. 630–632, https://doi.org/10.1785/0220120061.

Ogata, Y. 1988 Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes: Journal of the American Statistical Association, v. 83, no. 401, p. 9–27.

Omi, T., Ogata, Y., Hirata, Y., and Aihara, K., 2015, Intermediate-term forecasting of aftershocks from an early aftershock sequence—Bayesian and ensemble forecasting approaches: Journal of Geophysical Research, Solid Earth, v. 120, no. 4, p. 2561–2578.

Omori, F., 1894, On the aftershocks of earthquakes: Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo, v. 7, p. 111–200.

Ross, Z.E., Idini, B., Jia, Z., Stephenson, O.L., Zhong, M., Wang, X., Zhan, Z., Simons, M. Fielding, E.J., Yun, S., Hauksson, E., Moore, A.W., Liu, Z., and Jung, J., 2019, Hierarchical interlocked orthogonal faulting in the 2019 Ridgecrest earthquake sequence, Science, v. 366, no. 6463, p. 346–351, https://doi.org/10.1126/science.aaz0109.

Wells, D.L., and Coppersmith, K.J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 84, p. 974–1002.

Apéndice 1

Este apéndice presenta los parámetros técnicos para los dos escenarios utilizados para estimar las probabilidades de réplica. Estos valores se presentan para que los cálculos en este informe puedan reproducirse. El pronóstico se realiza utilizando el modelo de secuencia de réplicas de tipo epidémico (Ogata 1988). Para detalles sobre definiciones de parámetros y metodología ver Omi y otros (2015). Sustituimos el parámetro $a = \log_{10}K_0$ por productividad de réplicas en la ecuación 3 de Omi y otros 2015. También introducimos algunas modificaciones al método de Omi y otros (2015). Primero, el terremoto principal de esta secuencia es más productivo que el promedio, y usamos un parámetro adicional a_0 para modelar la contribución primaria del terremoto principal de magnitud 6.4. Segundo, como es común y esperado después de grandes terremotos, el catálogo de terremotos está incompleto en los primeros tiempos después de la magnitud 6.4 debido a la superposición de sismogramas de eventos casi simultáneos. Modelamos esto usando una constante de tiempo dependiente de la magnitud $c(M) \propto 10^{\gamma M}$ en la ley de Omori, siguiendo a de Arcangelis y otros (2018). Finalmente, para modelar secuencias de réplicas realistas, los parámetros del modelo de secuencia de réplicas de tipo epidémico deben restringirse a valores que den una tasa decreciente, en promedio. Las combinaciones de parámetros que producirían secuencias aceleradoras durante una duración inferior a 10 años se excluyen del modelado. Usando el modelo, generamos 10,000 secuencias de réplicas simuladas que describen lo que podría suceder en los próximos 10 años. Luego extraemos el porcentaje de secuencias simuladas que incluyen terremotos que coinciden con los criterios de las tablas 1 y 2 para estimar probabilidades y duraciones.

Ajustamos los primeros 10 días de observaciones después del terremoto principal de magnitud 6.4 para obtener el conjunto de parámetros más probable (tabla 1.1). Para generar escenarios de límite superior e inferior (escenario 1 y 2 en la tabla 1.1, respectivamente), luego fijamos el parámetro *p* de disminución de la tasa de réplicas a +/- una desviación estándar del valor más probable de $p = 0.95$, y reestimamos el resto de los parámetros.

Tabla 1.1 Parámetros del modelo y una incertidumbre de desviación estándar utilizada para las estimados en este informe.

Parámetros comunes a los escenarios 1 y 2	
Magnitud Terremoto principal	6.4
Centroide de secuencia de réplicas	17.9402° N, 66.8289° W
Radio de secuencia de réplicas	33.5 kilómetros (1.5 veces el radio de Wells and Coppersmith (1994) radius + 10 kilómetros)
Pendiente Gutenberg-Richter (supuesta)	$b = 1.0$
Tasa de fondo (supuesta)	$\mu = 0$
Duración de las observaciones utilizadas para entrenar el modelo	10 días
Duración utilizada para limitar secuencias aceleradoras	10 años
Magnitud mínima	4.0
Magnitud máxima	7.05
Número de simulaciones	10,000
Los mejores parámetros de ajuste (solución de máxima similitud)	
Productividad de réplicas primarias	$a_0 = -1.57 \pm 0.09$
Productividad de réplicas secundarias	$a_1 = -2.10 \pm 0.13$
Decaimiento de tasa de réplicas	$p = 0.95 \pm 0.07$, $\log_{10}c = -2.35 \pm 0.38$
Parámetros del escenario 1 (alta tasa de decaimiento)	
Productividad de réplicas primarias	$a_0 = -1.57 \pm 0.10$
Productividad de réplicas secundarias	$a_1 = -2.07 \pm 0.20$
Decaimiento de tasa de réplicas	$p = 1.02$, $\log_{10}c = -2.06 \pm 0.22$
Parámetros del escenario 2 (baja tasa de decaimiento)	
Productividad de réplicas primarias	$a_0 = -1.53 \pm 0.10$
Productividad de réplicas secundarias	$a_1 = -2.17 \pm 0.20$
Decaimiento de tasa de réplicas	$p = 0.88$, $\log_{10}c = -2.55 \pm 0.35$

Menlo Park Publishing Service Center, California
Manuscrito aprobado para publicación el 23 de enero, 2020
Editado por Phil A. Frederick
Diseño por Kimber Petersen

ISSN 2238-0328 (online)
https://doi.org/10.3133/ofr20201009