



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

**Facultad de ingeniería
Colegio de ingeniería geofísica**

**Introducción e implementación del concepto de parentesco
(*kinship*) en la sismicidad como observable premonitora de
terremotos. Aplicación a la sismicidad del sur de California.**

Tesis para obtener el título de:

Ingeniero Geofísico

Presenta:

Halia Azucena Reynoso Reynoso

Director:

Dr. Fidencio Alejandro Nava Pichardo

Codirector:

M.C. Yleana Claudia Martínez Mirón

Julio 2017

Dedicatoria

*A mis padres, María M. Reynoso y Máximo Reynoso,
por su confianza, apoyo y amor en todo momento.*

Agradecimientos

A la BUAP, por albergarme durante los últimos años y por todas las oportunidades y experiencias.

Quiero agradecer especialmente a mi Director de tesis, Dr. F. Alejandro Nava P., por todo su apoyo, motivación, paciencia y por recibirme como estudiante y como amiga; gracias a su orientación y dedicación, fue posible realizar ésta tesis.

Al jurado: M.C. Raúl Vázquez S. y cDr. José Luis González G., por sus enseñanzas dentro y fuera del aula de clases. A mi Codirectora, M.C. Yleana C. Martínez M., por su guía, consejos y por ser la primera en introducirme y desarrollar mi gusto por la sismología. Gracias a mis profesores y compañeros de la licenciatura.

A CICESE por recibirme de la mejor manera durante mi estancia en Ensenada y a CONACyT; el trabajo de la tesis fue elaborado como parte del proyecto 222795.

A todos mis amigos y amigas, especialmente a Bere, Magia y Mily, por impulsarme a cumplir mis metas. A Marychel y Dilan, por todos los momentos, cafés y risas.

A mi familia, por su cariño, paciencia y apoyo incondicional; los amo infinitamente.

Muchas gracias.

Tabla de contenido	
DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
TABLA DE CONTENIDO	4
LISTA DE FIGURAS	5
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.2 SISMOLOGÍA ESTADÍSTICA	8
1.2.1 Peligro y riesgo sísmicos.	8
1.2.2 Pronóstico y predicción sísmicos.	9
1.2.3 Pronóstico a largo, mediano y corto plazo.....	10
1.2.4 Premonitores	10
1.2.4.1 Sismológicos.....	10
1.2.4.2 Geoquímicos.....	11
1.2.4.3 Geofísicos.....	11
1.2 HIPÓTESIS	12
1.4 OBJETIVOS	12
1.4.1 Objetivo general.....	12
1.4.2 Objetivos particulares	13
CAPÍTULO 2. MÉTODO	13
2.1 RELACIÓN DE PARENTESCO ENTRE EVENTOS	13
2.2 VELOCIDADES REALES Y VELOCIDADES APARENTES.....	14
2.3 CATÁLOGOS SINTÉTICOS	15
CAPÍTULO 3. ZONA DE ESTUDIO	22
CAPÍTULO 4. DATOS.....	25
4.1 APLICACIÓN A DATOS REALES	25
4.2 SUB-CATÁLOGO CALIFORNIA 7.3	26
4.2.1 Velocidad elástica California 7.3 Pre.....	28
4.2.2 Velocidad elástica California 7.3 Post	33
4.2.3 Velocidad difusiva California 7.3 Pre.....	34
4.2.4 Velocidad difusiva California 7.3 Post	37
4.3 SUB-CATÁLOGO CALIFORNIA 7.2	38
4.3.1 Velocidad elástica California 7.2	39
4.3.2 Velocidad difusiva California 7.2	40
4.4 SUB-CATÁLOGO CALIFORNIA 7.1	41
4.4.1 Velocidad elástica California 7.1 Pre	42
4.4.2 Velocidad difusiva California 7.1 Pre.....	43
CAPÍTULO 5. DISCUSIONES	44
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

Lista de figuras

Figura 1 Ejemplo de distribución de hipocentros de <i>family1</i> con todos los eventos relacionados con $c = 3$	17
Figura 2. Ejemplo de distribución de hipocentros de <i>family1</i> con todos los eventos relacionados con $c = 3$ (izquierda). Histograma de velocidades de <i>family1</i> con $\Delta c = 0.1$	17
Figura 3. Ejemplo de distribución de hipocentros de <i>familyd1</i> con todos los eventos relacionados con $v = 3\text{km}^2/\text{año}$ (izquierda). Histograma de velocidades de <i>family1</i> con $\Delta v = 0.1\text{km}^2/\text{año}$	18
Figura 4. La figura 4(A) muestra el histograma de velocidades correspondiente al catálogo original <i>family1</i>	19
Figura 5. La figura 5(A) muestra el histograma de velocidades correspondiente al catálogo original <i>familyd1</i>	20
Figura 6. La figura 6(A) muestra el análisis de velocidad de <i>familyn</i> ; el catálogo contiene dos familias y eventos aleatorios	21
Figura 7. Mapa que muestra las ubicaciones de las principales características geográficas y tectónicas en el sur de California (Hauksson, 2011).....	22
Figura 8. Mapa de sismicidad en el sur de California (1981-2010). Las estrellas indican eventos con $M \geq 7$	25
Figura 9. Mapa de ubicación de los eventos pertenecientes al sub-catálogo <i>California 7.3</i> . 26	
Figura 10. Número cumulativo de eventos, cumulativa de momento liberado y ventanas de tiempo de <i>California 7.3</i> . En las figuras 8(A) se muestra las ventanas de tiempo previas al sismo ocurrido en 1992.....	27
Figura 11. Distribución de hipocentros de eventos pertenecientes a la ventana 1 (pre) de <i>California 7</i>	28
Figura 12. Distribución de distancias, r_{ij} (superior) y de intervalos de tiempo, t_{ij} (inferior) entre pares de eventos	28
Figura 13. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 1 previa al sismo de 1992 de <i>California 7.3</i> , promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar.	29
Figura 14. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 2 previa al sismo de 1992 de <i>California 7.3</i> , promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar.	30
Figura 15. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 3 previa al sismo de 1992 de <i>California 7.3</i> , promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar.	31

Figura 16. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 4 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar.	32
Figura 17. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 5 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar.	32
Figura 18. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 1 posterior al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar.	33
Figura 19. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar.	34
Figura 20. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 2 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar.	35
Figura 21. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 3 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar.	35
Figura 22. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 5 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar.	36
Figura 23. Análisis de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 5 previo al sismo de 1992 de California 7.3 y del promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS con y sin ruido, (arriba)	36
Figura 24. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 posterior al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar.	37
Figura 25. Mapa de ubicación de los eventos pertenecientes al sub-catálogo	38
Figura 26. Número cumulativo de eventos, cumulativa de momento liberado y ventanas de tiempo de California 7.2	39
Figura 27. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 1 previa al sismo de 2010 de California 7.2, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar.	39
Figura 28. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 previa al sismo de 2010 de California 7.2, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar.	40
Figura 29. Mapa de ubicación de los eventos pertenecientes al sub-catálogo	41

Figura 30 Número cumulativo de eventos, cumulativa de momento liberado y ventanas de tiempo de *California 7.1* 42

Figura 31. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 1 previa al sismo de 1999 de California 7.1, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. 42

Figura 32. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 previa al sismo de 1999 de California 7.1, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. 43

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Los terremotos representan uno de los fenómenos naturales de mayor impacto para la sociedad pues los daños y pérdidas que ocasionan pueden ser devastadores. Es de suma importancia estudiar los factores involucrados en la ocurrencia de estos eventos pues, a medida que adquirimos un mayor conocimiento sobre su naturaleza, avanzamos en la realización de pronósticos con mayor certeza. A través del pronóstico, es posible reducir el riesgo asociado con la ocurrencia de grandes sismos, mediante la toma de medidas preventivas, la elaboración de planes de acción ante emergencias y la educación de la población al respecto de éstas.

A medida que nos adentramos en el análisis de los procesos sísmicos, resulta evidente la complejidad de los modelos necesarios para describir sistemas físicos como la Tierra y la imposibilidad de tener modelos deterministas para predecir tiempo y lugar de ocurrencia y magnitud de futuros terremotos, porque, dado que los terremotos ocurren a profundidades de decenas o centenas de kilómetros, no se conoce bien el mecanismo de ruptura ni cuáles son los factores que la disparan, como tampoco es posible conocer a detalle la resistencia y el esfuerzo para cada punto del medio en que ocurren los sismos.

De hecho, como el proceso sísmico corresponde al de un sistema críticamente autoregulado (Bak y Tang, 1989; Turcotte, 1992), los sismos de magnitudes pequeñas ocurren de forma completamente aleatoria y la ocurrencia de grandes sismos, terremotos, no es periódica, sino que tiene una considerable componente estocástica. Por tanto, es necesario recurrir a métodos estadísticos y probabilísticos para aprovechar la información contenida en los datos de observaciones sismológicas. En el presente trabajo se propone un método para buscar un premonitor a la ocurrencia de grandes sismos, mediante el análisis estadístico de datos de catálogos sísmicos.

1.2 Sismología estadística

1.2.1 Peligro y riesgo sísmicos.

Peligro sísmico y riesgo sísmico son dos conceptos de la sismología estadística que son a menudo utilizados de manera intercambiable, por lo que es muy importante definir cuál es el significado exacto que les daremos en el presente trabajo.

Peligro sísmico (seismic hazard) es la probabilidad de ocurrencia de uno o más sismos en ventanas de espacio, tiempo y magnitud determinadas. Se entiende que las

ventanas espacio-temporales deben ser lo suficientemente pequeñas para que la determinación del peligro sea de utilidad, en tanto que la ventana de magnitud es usualmente abierta hacia grandes magnitudes, i.e. consiste solamente de una magnitud mínima, lo suficientemente grande para que el sismo sea considerado como terremoto, e implícitamente se extiende hasta la máxima magnitud posible en la región estudiada.

Riesgo sísmico (seismic risk) es la probabilidad de ocurrencia de algún efecto determinado, como aceleración máxima, intensidad, daños, fatalidades, etc., en un lugar determinado debido a la ocurrencia de uno o más sismos durante un intervalo de tiempo determinado. El riesgo sísmico incluye peligro y otros factores como atenuación, amplificación del suelo y vulnerabilidad y la ventana de tiempo corresponde generalmente a la vida útil de alguna instalación o construcción. La técnica conocida como *análisis probabilístico de peligro sísmico, (probabilistic seismic hazard analysis, PSHA)* (Cornell, 1968; Reiter, 1991) es, de acuerdo con nuestra definición, una estimación de riesgo.

En el presente trabajo nos dedicaremos exclusivamente al problema del peligro sísmico.

1.2.2 Pronóstico y predicción sísmicos.

Llamaremos pronóstico sísmico a la declaración de una estimación de peligro sísmico, junto con medidas de su confiabilidad y/o significatividad. El pronóstico sísmico estima la probabilidad de que un terremoto de cierta magnitud ocurra en un área particular durante un tiempo específico y utiliza la historia de los terremotos y otra información geofísica, por ejemplo, medidas del movimiento de la corteza a través de sistemas de posicionamiento global (Stein y Wysession, 2003).

Entenderemos por predicción sísmica a la declaración de que un terremoto ocurrirá ciertamente en una cierta ventana espaciotemporal. Como mencionamos antes, este tipo de predicción determinista es intrínsecamente imposible y es, por lo tanto, campo y herramienta de personas ignorantes o dolosas, que utilizan la predicción para lograr fines propios.

Sin embargo, es importante mencionar que estas definiciones no son universales y que hay científicos serios que utilizan el término “predicción” para lo que nosotros designamos como pronóstico, por lo que es importante tener cuidado al interpretar ambos términos.

1.2.3 Pronóstico a largo, mediano y corto plazo.

El objetivo de la investigación sobre la predicción de terremotos es desarrollar un conjunto coherente de modelos de probabilidades que abarquen toda la gama de escalas de tiempo del pronóstico (National Research Council, 2011). Existen tres categorías relativas al pronóstico sísmico: largo plazo (siglos a décadas), mediano plazo (años a meses), y a corto plazo (semanas a horas), antes de que ocurra un terremoto (Scholz, 1990). Debido a que se conoce poco acerca del mecanismo principal, muchos intentos para predecir terremotos a mediano y largo plazos se enfocan en la búsqueda de premonitores.

1.2.4 Premonitores

Para apoyar o modificar pronósticos a mediano y corto plazo, se recurre a la búsqueda de premonitores, es decir, fenómenos observables que preceden a los terremotos. Rigurosas pruebas son necesarias para decir si un posible precursor se correlaciona con terremotos (o con la ausencia de éstos) con mayor frecuencia que la esperada solo por coincidencia (Stein y Wysession, 2003).

No hay, hasta la fecha, premonitores “perfectos”, i.e., premonitores que ocurran si y sólo si va a ocurrir un terremoto, por tanto, es conveniente contar con el mayor número posible de premonitores.

1.2.4.1 Sismológicos

Precusores sismológicos son los relacionados con las características de sismos que ocurren antes de un terremoto o sismo principal.

Han sido observados cambios precusores en la razón de ocurrencia y en la concentración espacial de sismos; pero si bien estos cambios son distinguibles a posteriori, tras la ocurrencia del sismo principal, son difíciles de identificar a priori y a menudo pueden ocurrir aleatoriamente (e.g. Lomnitz y Nava, 1983)

Nuannin y Kulhánek (2012), encontraron que cambios en el valor b de la relación Gutenberg-Richter pueden ser utilizados como precursor a mediano plazo debido a que los grandes eventos sísmicos ocurren en intervalos de bajo valor de b interpretados como periodos de alto esfuerzo, mientras que b toma valores altos cuando los terremotos han liberado el esfuerzo acumulado.

Si las propiedades de las rocas cambian antes de un terremoto, la velocidad de las ondas sísmicas también debe variar (Bolt, 1981), porque los cambios en las velocidades

de las ondas de cuerpo (P y S) en un área sísmica pueden ser interpretadas como precursores.

La gran mayoría de grandes terremotos es precedida por pequeños sismos precursores en la misma región; hay pruebas considerables de que el sismo principal a menudo puede ser desencadenado por eventos más pequeños, pero hasta ahora no hay medios para determinar si un terremoto mayor se activará después de un evento dado, o si la actividad disminuirá sin mayores consecuencias (Lomnitz y Rosenblueth, 1976).

1.2.4.2 Geoquímicos

Otra clase de posible precursor involucra cambios en las propiedades de las rocas dentro de una zona de falla, precediendo a un gran terremoto. Se ha sugerido que a medida que una región experimenta una acumulación de esfuerzo y tensión, pueden formarse microfisuras y llenarse con agua, bajando la resistencia de la roca lo que eventualmente conduce a un terremoto. Este efecto se ha defendido con base en los datos que muestran cambios en el nivel de gas radón, debido a que el desarrollo de microfisuras permite el escape del gas. Un ejemplo es el radón detectado en aguas subterráneas, el cual aumentó considerablemente en los meses previos al terremoto de 1995 en Kobe; aumentó aún más dos semanas antes del terremoto y luego regresó a su nivel de fondo (Stein y Wysession, 2003).

1.2.4.3 Geofísicos

A partir de experimentos de laboratorio en muestras de rocas se sabe que la resistencia eléctrica de las rocas saturadas de agua, tales como el granito, cambia drásticamente en aparatos de alta presión, justo antes de la fractura de las rocas. Se ha realizado algunos experimentos en zonas de falla y los resultados indican disminuciones en la resistencia eléctrica antes de un terremoto (Bolt, 1981).

Otros fenómenos debatiblemente observables previos a la ocurrencia de terremotos son: cambios en el voltaje natural del terreno, cambios geomagnéticos y cambios gravimétricos.

Debido a que muchos fenómenos parecen ser precursores de terremotos, distintos niveles de predicción deben ser posibles. Desafortunadamente cada terremoto muestra extraordinaria variabilidad en el comportamiento de sus precursores, incluyendo la ausencia de cualquier precursor conocido.

1.2 Hipótesis

En el presente trabajo proponemos la hipótesis que, en una región donde el esfuerzo es suficientemente alto para que pueda ocurrir próximamente un terremoto, es posible que los sismos pequeños y medianos, que constituyen la sismicidad de fondo, puedan “disparar” otros eventos, i.e., precipitar la ocurrencia de sismos que ya estaban listos para ocurrir, mientras que cuando los esfuerzos son bajos y no puede ocurrir un terremoto, los eventos de la sismicidad de fondo ocurren de manera autónoma, es decir, la ocurrencia de unos no influencia la ocurrencia de otros.

Es importante mencionar que no nos referimos al bien documentado efecto de disparo de sismos causado por el arribo de ondas sísmicas (usualmente S o superficiales) generadas por la ocurrencia de sismos grandes, pues tales disparos ocurren a tiempos cortos después de éstos, pues las ondas sísmicas tienen velocidades del orden de km/s. La influencia que proponemos actúa con velocidades del orden de km/año.

Para probar la hipótesis, se desarrolló métodos para identificar relaciones entre eventos de catálogos sísmicos. Para probar la eficacia de dichos métodos y poder estimar qué tan significativos son sus resultados, se desarrolló catálogos sintéticos. Algunos catálogos sintéticos contienen eventos relacionados entre sí de manera conocida, mientras que otros, están hechos para representar la hipótesis nula que supone que los eventos no están relacionados, sino que ocurren en forma totalmente aleatoria.

Una vez probados los métodos, fueron aplicados a datos reales de sismicidad del sur de California, USA, para analizar las relaciones entre eventos para periodos previos y posteriores a sismos con magnitud $M_w > 7.0$, que corresponden a condiciones de alto y bajo esfuerzo respectivamente.

1.4 Objetivos

Buscar un nuevo premonitor a la ocurrencia de grandes sismos, consistente en la presencia o ausencia de la relación que llamaremos *parentesco (kinship)* descrita más adelante, entre eventos de la sismicidad de fondo que ocurren en ventanas de espacio y tiempo determinadas.

1.4.1 Objetivo general

Determinar la existencia, o no, de la relación de parentesco entre sismos ocurridos en intervalos de tiempo y espacio determinados.

1.4.2 Objetivos particulares

Los objetivos particulares fueron:

1. Desarrollar e implementar métodos para detectar la relación de parentesco entre sismos.
2. Probar dichos métodos mediante su aplicación a catálogos sintéticos con eventos relacionados entre sí o eventos sin relación alguna.
3. Probar los métodos en datos de catálogos reales.
4. Estimar la significatividad de los resultados, mediante la comparación con catálogos sintéticos correspondientes a la hipótesis nula.

CAPÍTULO 2. MÉTODO

2.1 Relación de parentesco entre eventos

Sea un conjunto de eventos sísmicos $e_i = (t_i, x_i, y_i, z_i, M_i); i = 1, \dots, N$, ocurridos dentro de un volumen y un intervalo de tiempo dados. La distancia entre los hipocentros de los eventos i y j es:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} . \quad (1)$$

Si posterior al evento ocurrido al tiempo t_i , ocurre otro evento al tiempo t_j , y dichos tiempos están relacionados como

$$t_j = t_i + \frac{r_{ij}}{c} , \quad (2a)$$

donde c es alguna velocidad de interacción elástica, o simplemente la llamaremos velocidad elástica y está expresada como distancia/tiempo (km/año), o como

$$t_j = t_i + \frac{r_{ij}^2}{v} , \quad (2b)$$

donde v es alguna velocidad de interacción difusiva, es decir, la velocidad que se observa en procesos de difusión (líquidos o gases) en los cuales el tiempo que tarda una señal (un disturbio) en viajar una distancia no es proporcional a ésta, sino a su cuadrado (km²/año). Es posible postular que los eventos j que cumplan la relación 2a o 2b están relacionados

con el evento anterior i , y se puede especular que fueron de algún modo disparados por éste.

Por tanto, podemos decir que c y v son velocidades con las cuales se transmite información entre eventos directamente relacionados (velocidad con la cual interactúan los eventos) y en cualquiera de los casos debe ser la misma para todos los eventos.

Si los eventos i y j se encuentran relacionados de acuerdo con (2a) o (2b) consideraremos que están *emparentados* como *padre e hijo* respectivamente. Dado que un padre puede tener varios hijos y estos, a su vez, pueden tener hijos (estar emparentados con eventos posteriores), es posible considerar a los eventos relacionados entre sí, directa o indirectamente como familias de eventos.

2.2 Velocidades reales y velocidades aparentes

Para un total de N eventos, hay $N(N-1)/2$ pares de eventos y de distancias y diferencias de tiempos entre ellos; sea la diferencia de tiempo de ocurrencia entre los eventos e_i y e_j , $i < j$,

$$t_{ij} = t_j - t_i; \quad (3)$$

entonces

$$\frac{r_{ij}}{t_{ij}} = c_{ij} \quad (4a)$$

y

$$\frac{r_{ij}^2}{t_{ij}} = v_{ij}, \quad (4b)$$

son velocidades que, para pares de eventos directamente relacionados llamaremos velocidades reales $c_{ij} \approx c$ o $v_{ij} \approx v$, mientras que para eventos que no guardan relación directa, esto es, no corresponden a propagación de energía o información, llamaremos *velocidades aparentes*, cuyo valor puede ir desde cero, para eventos ocurridos en el mismo lugar, en distintos tiempos, $r_{ij} = 0$, hasta infinito, para el caso de eventos que ocurren en distintos lugares al mismo tiempo, $t_{ij} = 0$.

Aun cuando en un conjunto de datos todos los eventos se encuentren emparentados, no necesariamente todos estarán relacionados de manera directa; cada padre estará relacionado de manera directa con sus hijos, pero en general no lo estará con sus nietos, bisnietos, etc. Las velocidades entre eventos que no estén emparentados directamente también serán llamadas velocidades aparentes.

Las velocidades aparentes tienen valores que son más o menos al azar; simulaciones Montecarlo (descritas más adelante) muestran distribuciones de velocidad con un máximo relacionado con las dimensiones espaciotemporales del experimento, baja curtosis y fuerte sesgo con larga cola para velocidades aparentes grandes.

Si un significativo porcentaje de eventos está directamente emparentado, las incidencias de la velocidad real en el histograma de velocidades serán mayores que las de las combinaciones aleatorias, y producirán un pico que sobresale de la distribución de velocidades aparentes y permite identificar la velocidad real. La comparación de la amplitud de éste pico con la del nivel de velocidades aparentes aporta información respecto al grado de parentesco entre los eventos; su localización indica el valor de la velocidad real y su dispersión indica el grado de heterogeneidad de la velocidad real en el medio.

2.3 Catálogos sintéticos

Para crear familias de eventos sintéticos fueron desarrollados programas que permiten generar hipocentros distribuidos en el espacio, relacionados a través de las relaciones de parentesco (2a) o (2b). Estos programas generan hipocentros de acuerdo con los parámetros: número de familias, N_f , máximo número de hijos por padre, K , máxima distancia entre padres e hijos, R , y máximo número de generaciones por familia, G . En cada caso, el número de hijos, la distancia de cada hijo con respecto a su padre y la dirección entre padre e hijo son generados aleatoriamente.

Para generar la posición (x_i, y_i, z_i) y tiempo de ocurrencia t_i , $i = 1$, del primer evento de cada familia, i.e. de cada *paterfamilias*, se utilizó la máxima distancia del volumen (tentativo) a considerar que tiene dimensiones XX , YY y ZZ :

$$x_i = x_{\min} + XX / 4 + \text{rand} \cdot XX / 2 ,$$

$$y_i = y_{\min} + YY / 4 + \text{rand} \cdot YY / 2$$

$$z_i = z_{\min} + ZZ / 4 + \text{rand} \cdot ZZ / 2$$

$$t_i = \text{rand} \cdot \frac{1}{4} \frac{D}{c} \text{ o } t_i = \text{rand} \cdot \frac{1}{4} \frac{D^2}{v},$$

donde $D = \sqrt{XX^2 + YY^2 + ZZ^2}$, y rand es una función de Matlab que genera números pseudoaleatorios en el intervalo (0,1).

El número de hijos del i ésimo padre se calcula como

$$k_i = \text{rand} \cdot K$$

La posición de cada hijo j de un padre i es generada a partir de la distancia entre padre e hijo

$$r_{ij} = \text{rand} \cdot R ; j = 1, \dots, k_i,$$

donde R es la distancia máxima entre padres e hijos, y la orientación aleatoria obtenida de

$$e_{xj} = \text{rand} - \frac{1}{2}, \quad e_{yj} = \text{rand} - \frac{1}{2}, \quad e_{zj} = \text{rand} - \frac{1}{2},$$

$$e = \sqrt{e_{xj}^2 + e_{yj}^2 + e_{zj}^2}$$

$$x_j = x_i + r_{ij} \frac{e_{xj}}{e}, \quad y_j = y_i + r_{ij} \frac{e_{yj}}{e}, \quad z_j = z_i + r_{ij} \frac{e_{zj}}{e};$$

y el tiempo de ocurrencia del hijo es

$$t_j = t_i + t_{ij},$$

donde

$$t_{ij} = \frac{r_{ij}}{c} \text{ o } t_{ij} = \frac{r_{ij}^2}{v}.$$

En la figura 1 se observa dos familias con eventos emparentados con $c=3\text{km/yr}$. Los números indican la generación a la que pertenecen los eventos emparentados, las líneas punteadas de color rojo unen cada padre con sus hijos. Los asteriscos azules indican los eventos no emparentados.

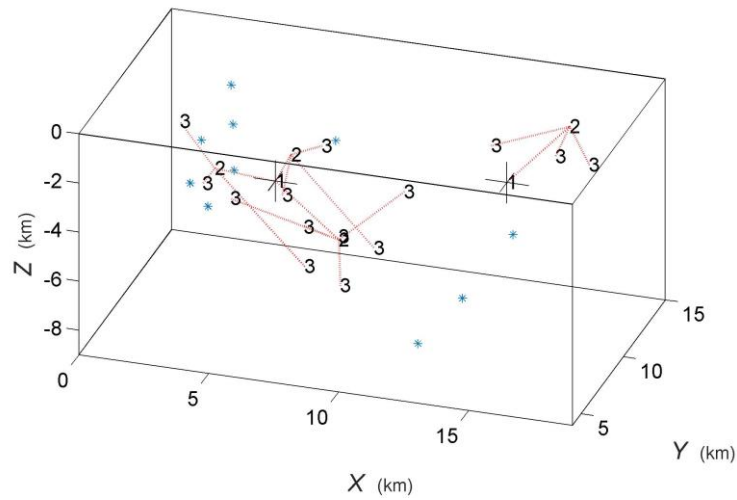


Figura 1. Ejemplo de dos familias con eventos emparentados con velocidad $c=3$ km/yr.

La figura 2(A) muestra la distribución de hipocentros de un catálogo sintético que llamaremos *family1*, el cual consta de una sola familia de 50 eventos emparentados con $c = 3.0$ km/año . Se aplicó el análisis de velocidades (4a) a *family1*. La figura 2(B) muestra el resultado de la aplicación de este análisis a *family1*. Es posible identificar en el histograma la mayor abundancia de la velocidad “real” utilizada para crear la familia sobre el fondo de velocidades aparentes con valores en el rango de 0.202052 km/año a 1779.385471 km/año, de las cuales sólo se muestra la distribución hasta 20 km/año.

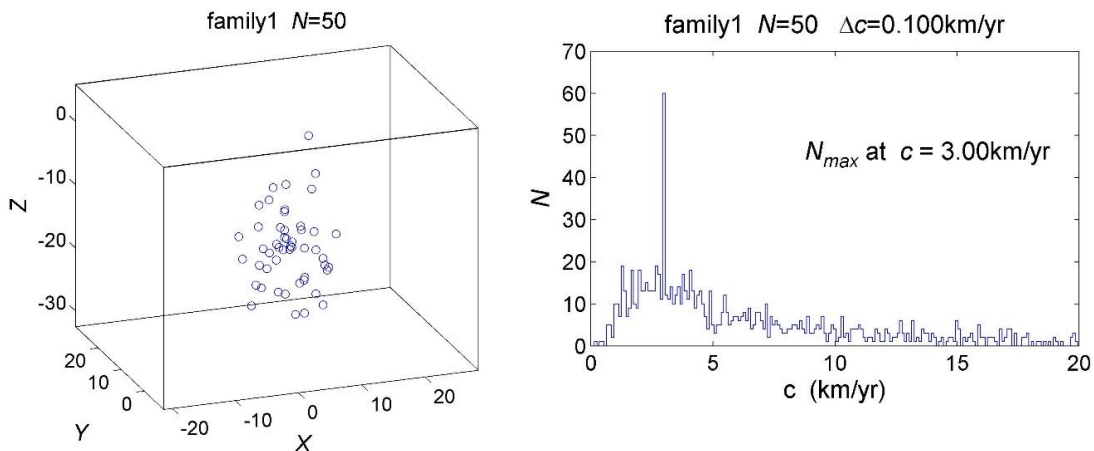


Figura 2. Ejemplo de distribución de hipocentros de *family1* con todos los eventos relacionados con $c = 3$ (izquierda). Histograma de velocidades de *family1* con $\Delta c = 0.1$. El pico grande identifica correctamente la velocidad “real” que se utilizó para crear la familia con 49 eventos relacionados, más 16 velocidades aparentes que resultaron por coincidencia dentro de la misma clase (derecha).

Para una familia de eventos *familyd1*, todos emparentados con velocidad difusiva $v = 3.0\text{km}^2/\text{año}$, en las figuras 3(A) y 3(B) se observa la distribución de 50 hipocentros y el resultado del análisis de velocidades (5b) en el histograma. Es posible observar mayor abundancia de la velocidad “real” difusiva, que se utilizó para crear la familia.

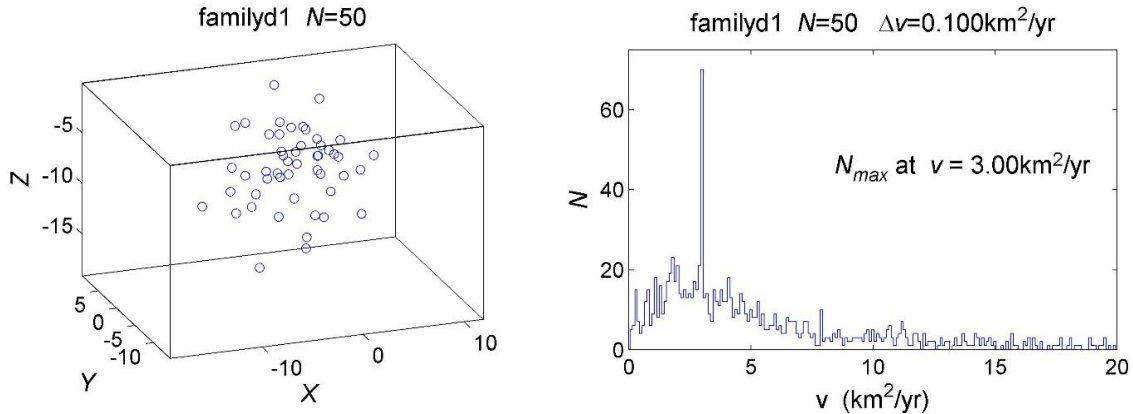


Figura 3 Ejemplo de distribución de hipocentros de *familyd1* con todos los eventos relacionados con $v = 3\text{km}^2/\text{año}$ (izquierda). Histograma de velocidades de *familyd1* con $\Delta v = 0.1\text{km}^2/\text{año}$. El pico grande identifica correctamente la velocidad “real” que se utilizó para crear la familia con 49 eventos relacionados, más 20 velocidades aparentes que resultaron por coincidencia dentro de la misma clase (derecha).

Con el fin de explorar el desempeño del análisis de velocidades ante la hipótesis nula, fueron creados catálogos que llamaremos *H0*, los cuales consisten de N eventos distribuidos aleatoriamente con probabilidades uniformes dentro de los intervalos $[x_{\min}, x_{\max}]$, $[y_{\min}, y_{\max}]$, $[z_{\min}, z_{\max}]$ y $[t_{\min}, t_{\max}]$, que corresponden a los de los catálogos originales.

Ya que en la realidad la distribución espacial de eventos no es uniforme, para simular condiciones más realistas fueron creados catálogos *H0T*, en los cuales los hipocentros son los mismos de los catálogos originales, pero los tiempos fueron generados de forma aleatoria con distribución uniforme, dentro del mismo intervalo de tiempo. Para ser aún más realistas, se creó otro tipo de catálogos, *H0TS*, con los mismos hipocentros y tiempos de los catálogos originales pero con los tiempos *barajados*, i.e. reasignados aleatoriamente a eventos distintos; en estos catálogos, tanto distancias como tiempos tienen las mismas distribuciones que las del catálogo original.

Es posible ver que las velocidades aparentes tienen mayor abundancia en un intervalo determinado por las dimensiones espacio-temporales del catálogo, pero éstas no difieren en gran medida de sus velocidades vecinas. Las distribuciones de los catálogos

de la hipótesis nula, Figuras 4(B), 4(C) y 4(D), presentan baja curtosis y alta asimetría con una larga cola para velocidades grandes; no es posible identificar picos que indiquen velocidades reales.

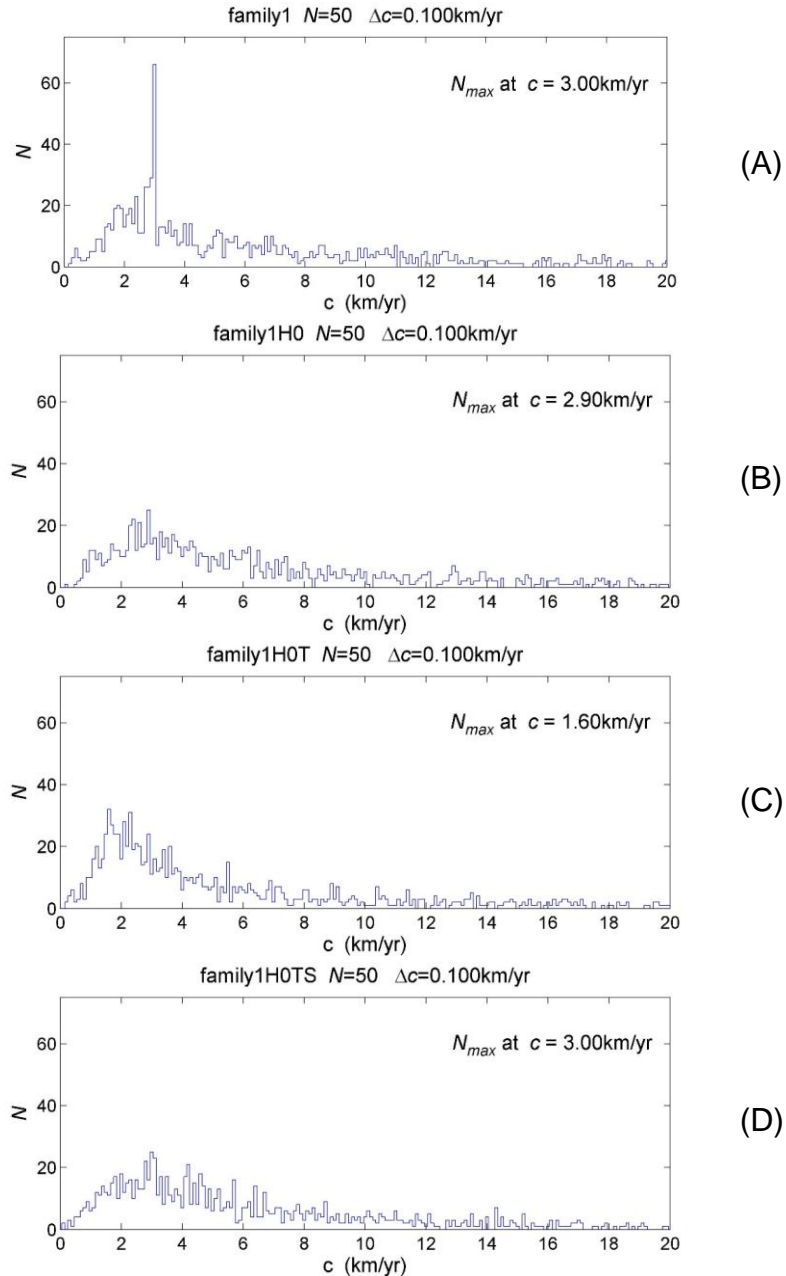


Figura 4. La figura 4(A) muestra el histograma de velocidades correspondiente al catálogo original *family1*, el rango de velocidades aparentes oscila entre 0.202052 km/año y 1779.385471 km/año, pero solo se muestra velocidades hasta de 20 km/año. En las figuras 4(B), 4(C) y 4(D) se observa histogramas de velocidades de catálogos sintéticos tipo H0, H0T y H0TS respectivamente, los cuales fueron generados con las mismas dimensiones espacio-temporales de *family1*.

En las distribuciones de los catálogos sintéticos de la hipótesis nula para velocidades difusivas, Figuras 5(B), 5(C) y 5(D), no aparecen picos que indiquen velocidades significativas; se observa baja curtosis y alta asimetría con larga cola para velocidades grandes.

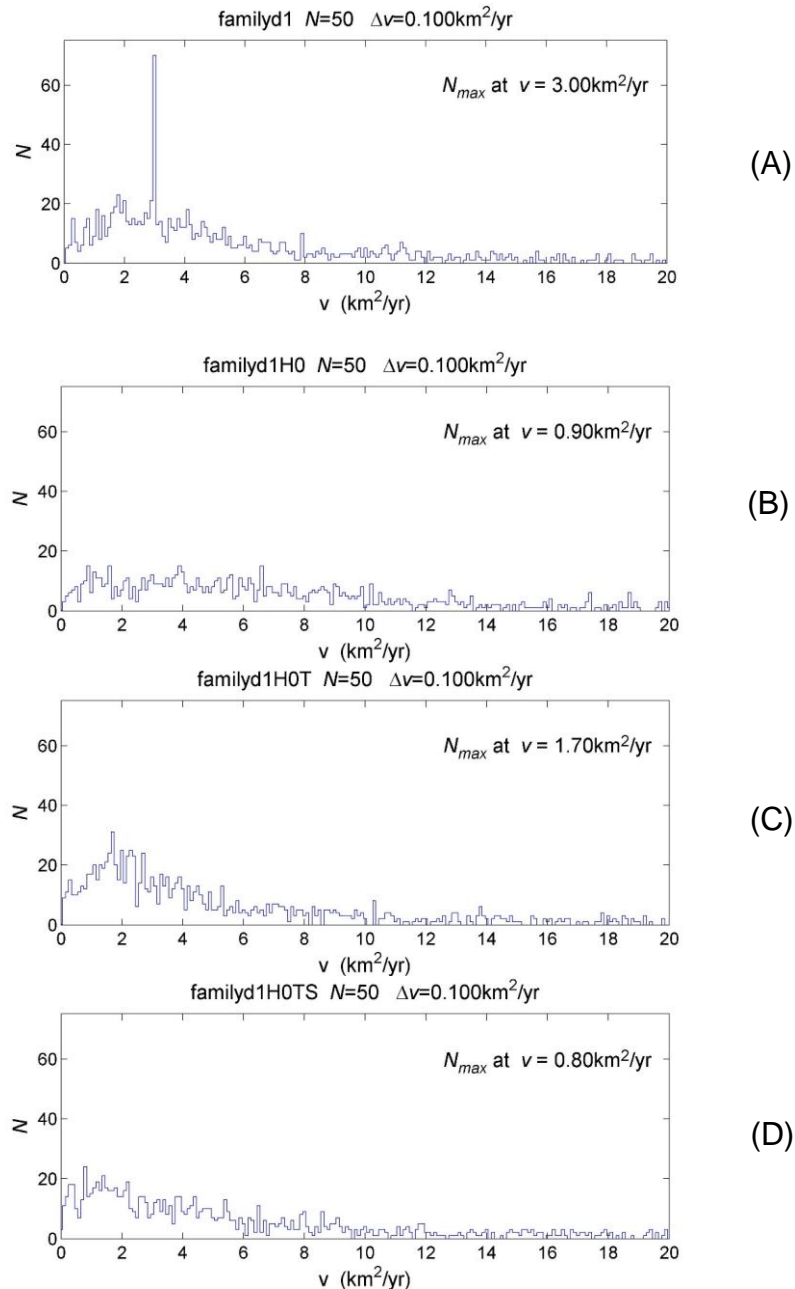


Figura 5. La figura 5(A) muestra el histograma de velocidades correspondiente al catálogo original *familyd1*, el rango de velocidades aparentes oscila entre $0.072940 \text{ km}^2/\text{yr}$ y $5417.739291 \text{ km}^2/\text{año}$ pero solo se muestra velocidades hasta de $20 \text{ km}/\text{año}$. En las figuras 5(B), 5(C) y 5(D) se observa histogramas de velocidades de catálogos sintéticos tipo H0, HOT y HOTS respectivamente, los cuales fueron generados con las mismas dimensiones espacio-temporales de *familyd1*.

Para comparar los catálogos sintéticos de familias e hipótesis nula con posibles familias de datos reales, es posible añadir a los catálogos sintéticos eventos aleatorios no relacionados con alguna familia, y así determinar la efectividad de la identificación de velocidades reales en presencia de ruido.

En la figura 6 se muestra el resultado del catálogo *familyn*, el cual contiene 2 familias con un total de 50 eventos más 10 eventos aleatorios y ruido añadido a los tiempos. El ruido se distribuye normalmente con desviación estándar de 0.02 y 0.05 años. Es posible observar que, al aumentar el ruido, disminuye la amplitud el pico que indica la velocidad significativa.

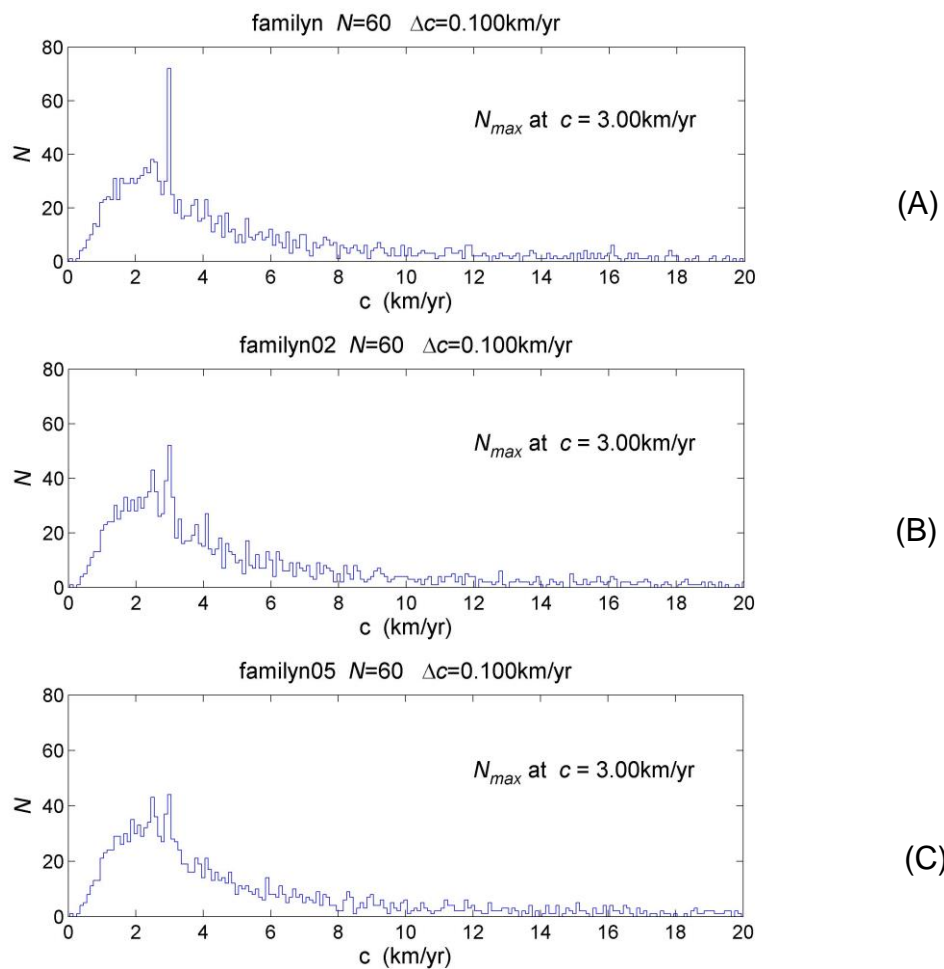


Figura 6. La figura 6(A) muestra el análisis de velocidad de *familyn*; el catálogo contiene dos familias y eventos aleatorios. En las figuras 6(B) y 6(C) se muestra el análisis de velocidad de *familyn* con ruido añadido a los tiempos; 0.02 y 0.05 años respectivamente. Se observa que, al aumentar el ruido, es más difícil identificar un pico que indique alguna velocidad significativa.

CAPÍTULO 3. ZONA DE ESTUDIO

El sur de California es una porción del complejo límite entre las placas Pacífico y Norteamericana que circunda dentro del cinturón volcánico. Dicha área ha sido tectónicamente activa durante todo el cenozoico medio y tardío y es cortada por numerosas fallas, muchas de cuales son consideradas activas. El tectonismo se ha acelerado durante la última parte de esta era con actividad máxima en el cuaternario (United States, 1983). La deformación tectónica de la placa Pacífico-Norteamericana es la principal causa de pequeños y grandes terremotos en el sur de California, el límite ha evolucionado con el tiempo, hace 30 millones de años, toda la costa oeste de California era una zona de subducción (donde una placa es forzada bajo otra), parecida a la actual línea de costa Oregon-Washington. Desde hace 30 millones de años, la falla de San Andrés ha estado cortando su camino hacia el noroeste a través del margen costero de California (USGS, 2001). Procesos secundarios tal como explotación geotérmica, colapso gravitatorio extensional o delaminación de la corteza, también causan sismicidad continua (Hauksson, Yang y Shearer, 2012).

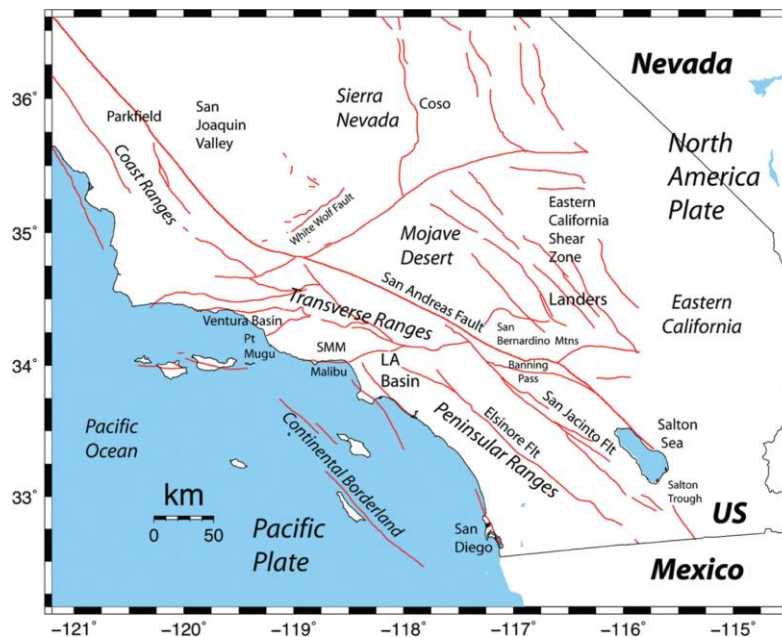


Figura 7. Mapa que muestra las ubicaciones de las principales características geográficas y tectónicas en el sur de California (Hauksson, 2011).

La deformación por cizallamiento causada por el movimiento de la placa del Pacífico y de Norteamérica se localiza a lo largo de las principales superficies de

deslizamiento de las fallas del cuaternario tardío, que forman una región impresionante de aproximadamente 300 km de ancho en el sur de California (Tape et al., 2009).

La tasa de sismicidad de $M \geq 3$ en el sur de California muestra dos ciclos con períodos de alta actividad de 1945 a 1952 y 1969-1992, y menor actividad de 1952-1969 y 1992-1997. Las caídas abruptas en la tasa de sismicidad ocurrieron después de los terremotos de 1952 Kern County de $M=7.5$ y 1992 Landers de $M=7.3$ (Jones y Hauksson, 1997).

Los principales terremotos ocurren a lo largo de las principales superficies de deslizamiento, pero la tasa de sismicidad de fondo decae lejos de cada superficie, formando una amplia zona de deformación de la corteza (Hauksson, 2010). Cada año, cerca de 14000 sismos de $M > 1$ son registrados por el SCSN (Hutton et al., 2010). La disponibilidad de localizaciones sísmicas de alta precisión permite medir con precisión las distancias entre los hipocentros individuales y las principales superficies de deslizamiento. La distribución de estas mediciones muestra que la sismicidad de fondo se encuentra cerca de las principales superficies de deslizamiento (Hauksson, 2010).

Las principales fallas en el sur de California son: San Andrés, San Jacinto, Imperial y Elsinore, con longitud de 1200 km, 210 km, 69 km y 180 km respectivamente y son de tipo deslizamiento lateral derecho. (SCEC, 2017).

- Las mayores rupturas de la falla de San Andrés ocurrieron el 9 de enero de 1857 y el 18 de abril de 1906. El intervalo de las principales rupturas es en promedio de 140 años y el intervalo de recurrencia varía mucho, desde 20 hasta más de 300 años. Su tasa de deslizamiento es de 20 a 35 mm por año.
- La ruptura más reciente de la falla San Jacinto fue en abril de 1968, la tasa de deslizamiento de la falla es 7 a 17 mm por año. El intervalo entre rupturas superficiales es entre 100 y 300 años.
- El intervalo entre las mayores rupturas de la falla Imperial varía, pueden ocurrir terremotos iguales o mayores que los ocurridos en 1979, cada 30 o 40 años, y cada 700 años como el terremoto ocurrido en 1940. La tasa de deslizamiento de la falla es de 15 a 20 mm por año.
- La falla Elsinore tiene una tasa de deslizamiento de 4 mm por año, el intervalo entre las mayores rupturas es en promedio de 250 años.

Con $M_w = 7.3$, el terremoto de Landers fue el mayor terremoto que azotó el sur de California en 40 años. Centrado en el Desierto de Mojave, aproximadamente a 120 millas de Los Ángeles, el terremoto causó relativamente poco daño por su tamaño. La longitud total de la ruptura fue ~85 km. Las fallas cercanas también experimentaron un deslizamiento y una pequeña rotura superficial.

CAPÍTULO 4. DATOS

4.1 Aplicación a datos reales

Para probar la hipótesis, se aplicó el análisis de velocidades al catálogo con datos sísmicos del Southern California Earthquake Center (SCEC), con eventos localizados entre las longitudes 114°W y 121°W y latitudes 31°N y 37°N, ocurridos entre los años 1981 y 2010. Las magnitudes del catálogo corresponden a magnitud momento M_w .

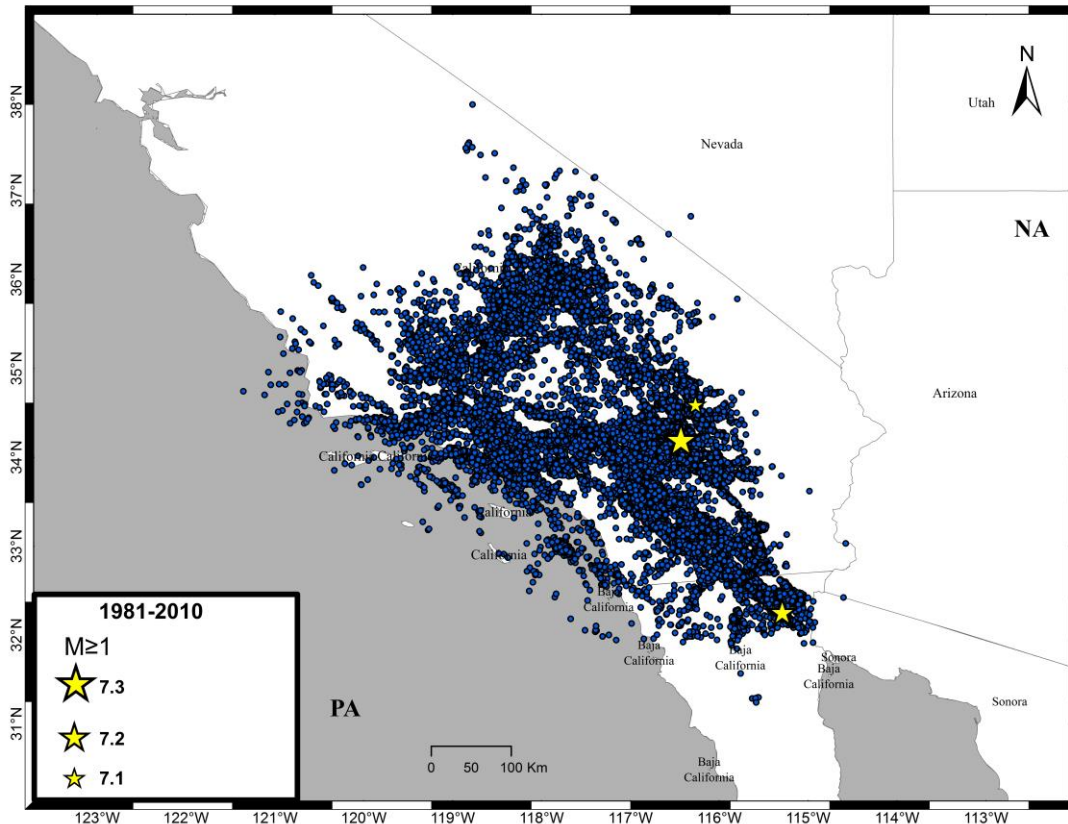


Figura 8. Mapa de sismicidad en el sur de California (1981-2010). Las estrellas indican eventos con $M \geq 7$. NA y PA indican la placa Norteamericana y Pacífico respectivamente.

Se exploró el catálogo para buscar eventos con $M \geq 7$ y fueron identificados tres eventos con magnitudes 7.3, 7.2 y 7.1, ocurridos en 1992, 2010 y 1999 respectivamente; sus epicentros están indicados por estrellas en el mapa de la figura 8. Posteriormente se seleccionó sub-catálogos con eventos ocurridos en volúmenes que contienen a los hipocentros de los eventos con $M \geq 7$. Fueron escogidas ventanas de tiempo con eventos previos y posteriores (pasada la mayor ocurrencia de réplicas) al sismo con $M = 7.3$. Debido a las características del catálogo, no fue posible elegir ventanas de

tiempo previas y posteriores para los sismos con $M=7.2$ y $M=7.1$, por lo tanto, se muestra solo las ventanas de tiempo que fue posible seleccionar de acuerdo con el catálogo.

Las coordenadas de longitud y latitud del catálogo original, fueron cambiadas en los sub-catálogos a coordenadas cartesianas, en km, referidas al epicentro del sismo principal en cada sub-catálogo

4.2 Sub-catálogo California 7.3

El primer sub-catálogo, que llamaremos *California 7.3*, corresponde a la región del sismo de magnitud $M=7.3$, ocurrido en $t=1992.4904325$, en longitud -116.4315° , latitud 34.203° y profundidad 2.790 km.

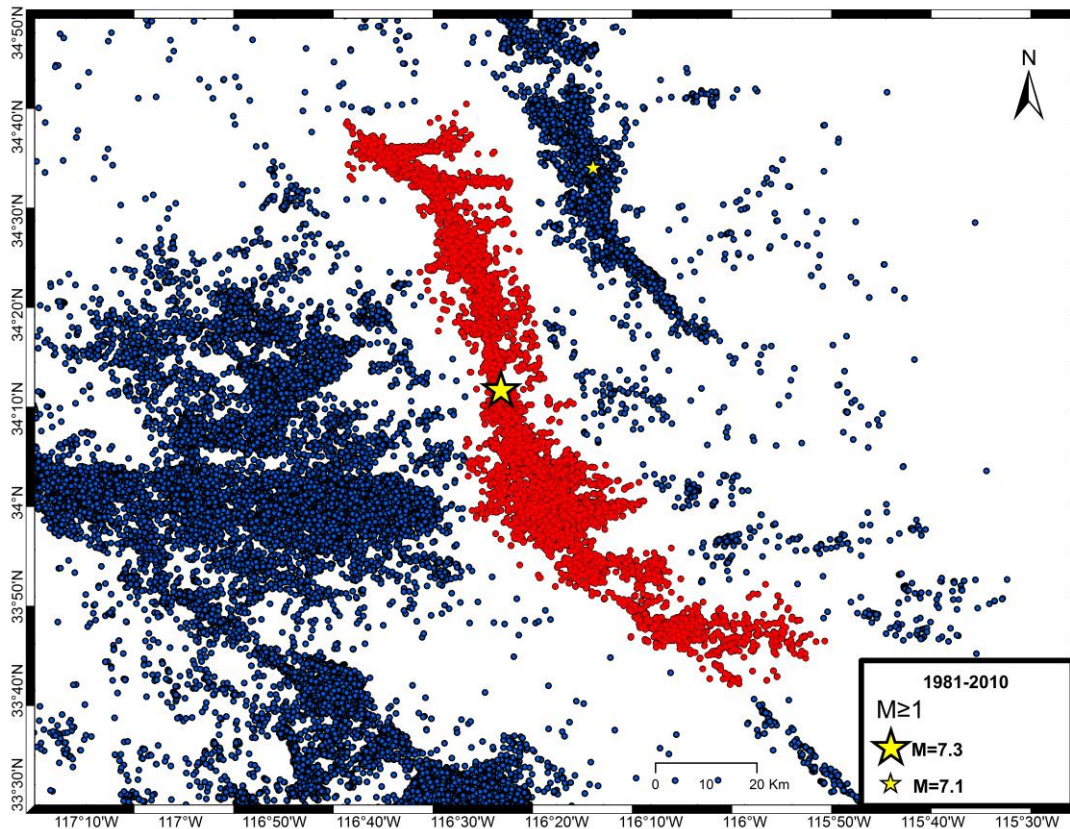


Figura 9. Mapa de ubicación de los eventos pertenecientes al sub-catálogo *California 7.3*.

Seleccionamos ventanas de tiempo, cinco corresponden a eventos previos y una a eventos posteriores a la ocurrencia del sismo de 1992. Cada ventana consta de 500 eventos. En las figuras 10A y 10B se muestra gráficas con la distribución de eventos del catálogo (superior) y del momento sísmico (inferior), en el tiempo.

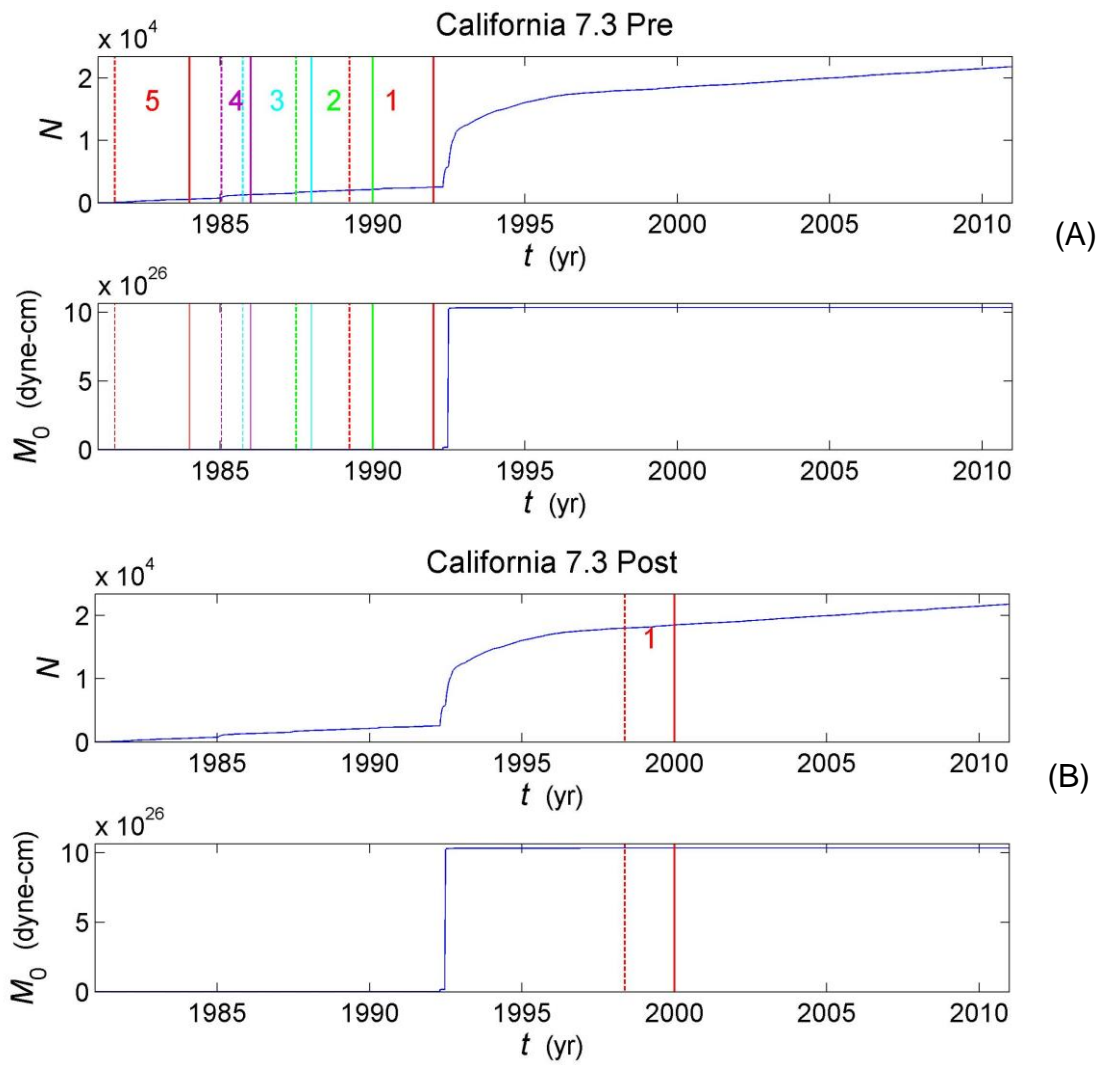


Figura 10. Número cumulativo de eventos, cumulativa de momento liberado y ventanas de tiempo de *California 7.3*. En las figuras 8(A) se muestra las ventanas de tiempo previas al sismo ocurrido en 1992. En la figura 8(B) se muestra una ventana de tiempo posterior al mismo sismo.

4.2.1 Velocidad elástica California 7.3 Pre

Ventana 1

La ventana de tiempo 1, previa al sismo ocurrido en 1992, Cal73pre-1, contiene 500 eventos en el intervalo de tiempo, $t_1 = 1992.000$ y $t_2 = 1989.244492875$.

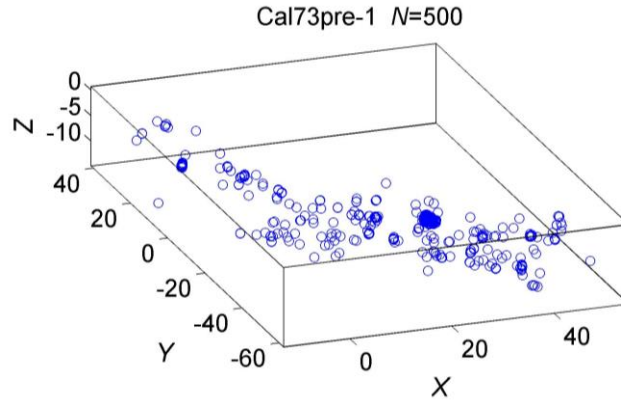


Figura 11. Distribución de hipocentros de eventos pertenecientes a la ventana 1 (pre) de *California 7.3*.

En la figura 12, se muestra la distribución de distancias, r_{ij} e intervalos de tiempo, t_{ij} entre pares de eventos pertenecientes a la ventana de tiempo 1, de *California 7.3*.

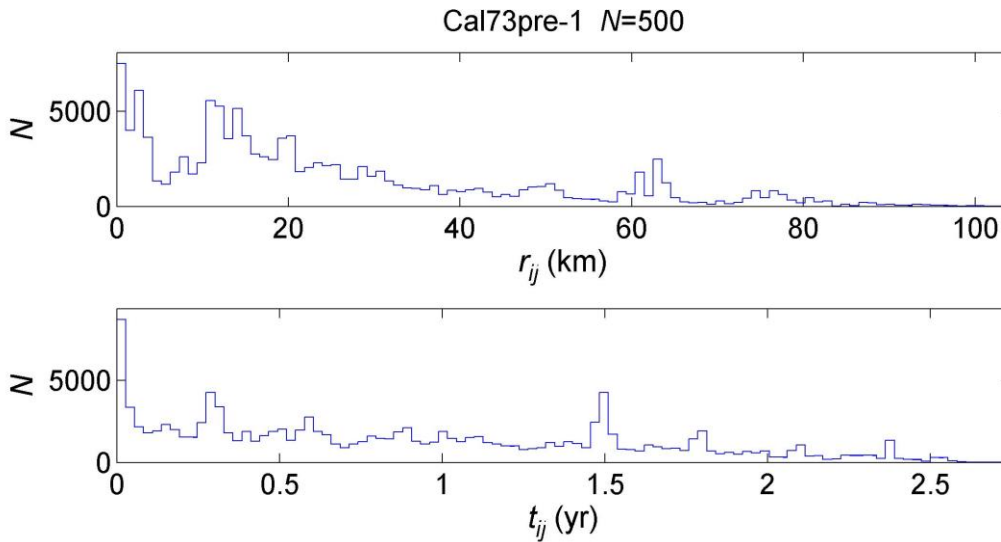


Figura 12. Distribución de distancias, r_{ij} (superior) y de intervalos de tiempo, t_{ij} (inferior) entre pares de eventos.

Las distribuciones de distancias entre pares de eventos de los catálogos sintéticos *HOT*, coinciden con las distribuciones de distancias entre eventos de los catálogos

originales. Las distribuciones de distancias y de intervalos de tiempo de los catálogos sintéticos *HOTS*, coinciden ambas con las distribuciones respectivas de los catálogos originales.

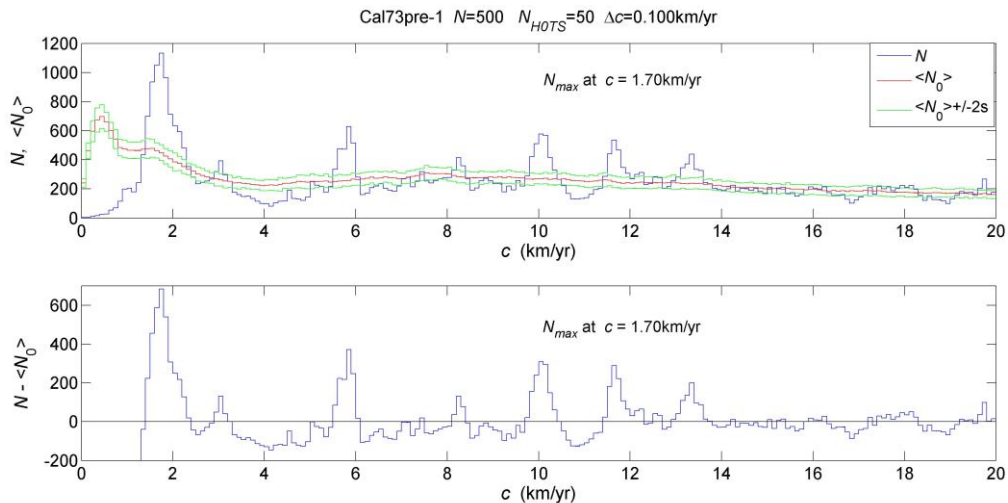


Figura 13. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 1 previa al sismo de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 1 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

La figura 13 muestra un histograma de velocidades obtenidas mediante (4a) para los eventos del sub-catálogo Cal73pre-1; las velocidades aparentes se distribuyen en el rango de 0 a 213045017.156007 km/año, pero solo se muestra la distribución hasta 20 km/año debido a que, a velocidades mayores no hay picos significativos y las amplitudes son bajas.

En la figura 13 fue posible identificar un alto pico localizado a la velocidad elástica $c=1.7\text{ km/yr}$. Para juzgar qué tan significativo es dicho pico, se muestra en la misma figura el promedio de 50 realizaciones HOTS (línea roja $\langle N_0 \rangle$) y el promedio más/menos dos desviaciones estándar (líneas verdes); es claro que el número de eventos del pico es bastante mayor que la que podría esperarse para velocidades aparentes, lo cual indica un alto número de eventos relacionados con dicha velocidad, es decir, indica parentesco significativo entre los eventos del sub-catálogo. Es posible observar otros picos en clases con velocidades mayores, pero el número de eventos contenidos en ellos es notablemente menor que la concentración de eventos en el primer pico.

Ventana 2

La ventana de tiempo 2, previa al sismo ocurrido en 1992, Cal73pre-2, contiene 500 eventos en el intervalo de tiempo, $t_1 = 1990.000$ y $t_2 = 1987.487540213$. En la figura 14 podemos ver que el mayor número de eventos corresponde a la clase con velocidad $c = 15.50$ km/yr. El pequeño pico localizado en ésta clase no difiere significativamente de los otros picos de la distribución. Es evidente la diferencia del menor número de eventos de éste pico y el largo pico de la ventana 1.

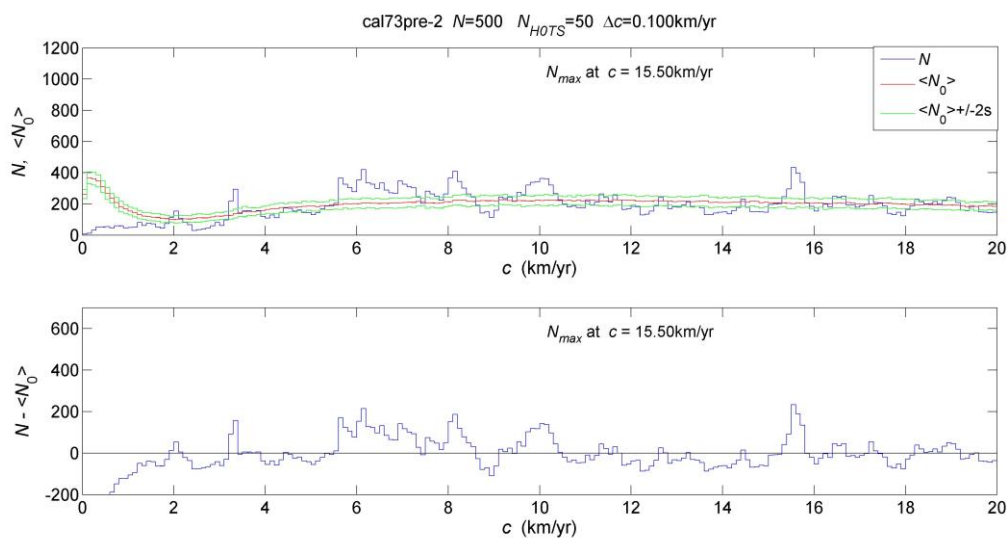


Figura 14. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 2 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 2 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

Ventana 3

La ventana de tiempo 3, previa al sismo ocurrido en 1992, Cal73pre-3, contiene 500 eventos en el intervalo de tiempo, $t_1 = 1988.000$ y $t_2 = 1985.748800703$.

Es posible ver un pico localizado en la clase que contiene a la velocidad $c=8.10$ km/yr aun después de la diferencia de distribuciones del catálogo real y las realizaciones de la hipótesis nula. El pico contiene un significativo número de eventos

comparado con el número de eventos del sub-catálogo, pero es menor que el alto pico de la ventana 1.

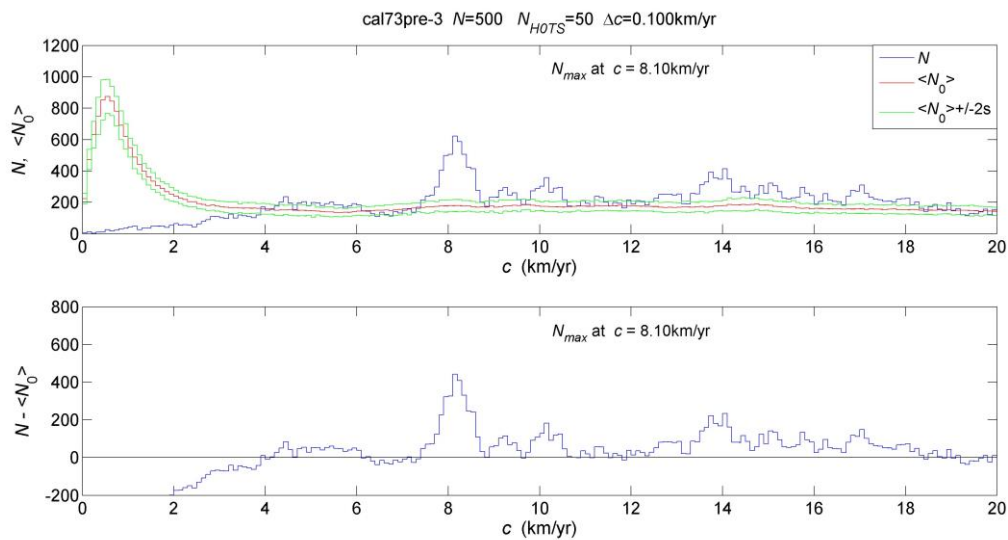


Figura 15. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 3 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 3 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

Ventana 4

La ventana de tiempo 4, previa al sismo ocurrido en 1992, Cal73pre-4, contiene 500 eventos en el intervalo de tiempo, $t_1 = 1986.000$ y $t_2 = 1985.049422045$. No fue posible identificar un pico que indicara un significativo número de eventos emparentados. Los eventos están distribuidos aproximadamente, antes y después de realizar la diferencia del sub-catálogo real y las realizaciones de la hipótesis nula. En la figura 16 (abajo), que corresponde a la diferencia de distribuciones del sub-catálogo real y la hipótesis nula, se observa valores negativos en las primeras clases del histograma. Esto se debe al bajo número de eventos contenidos en dichas clases antes de realizar la diferencia con los catálogos de la hipótesis nula HOTS. Así como en las familias de los catálogos sintéticos, los eventos presentan un rango de mayor concentración determinado por las dimensiones espacio-temporales del sub-catálogo.

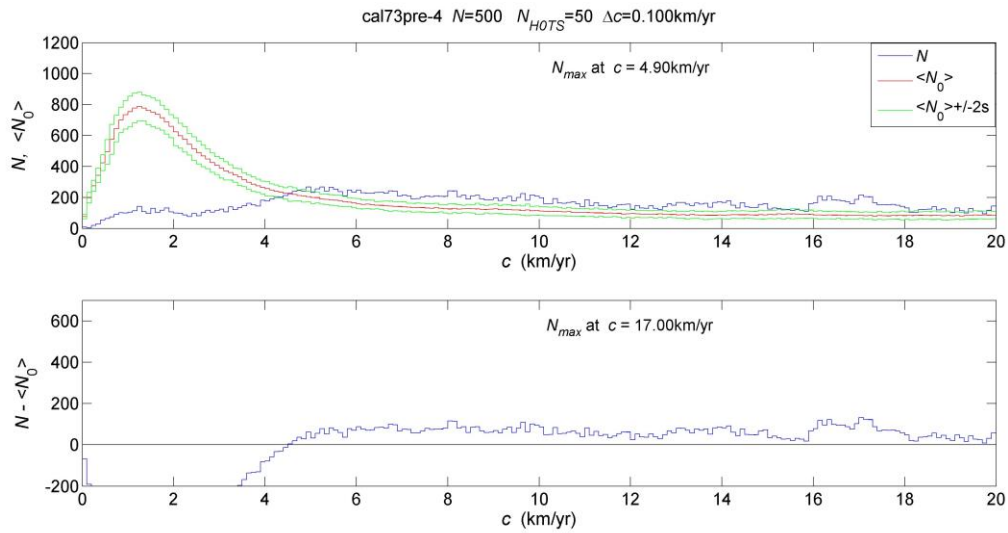


Figura 16. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 4 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 4 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

Ventana 5

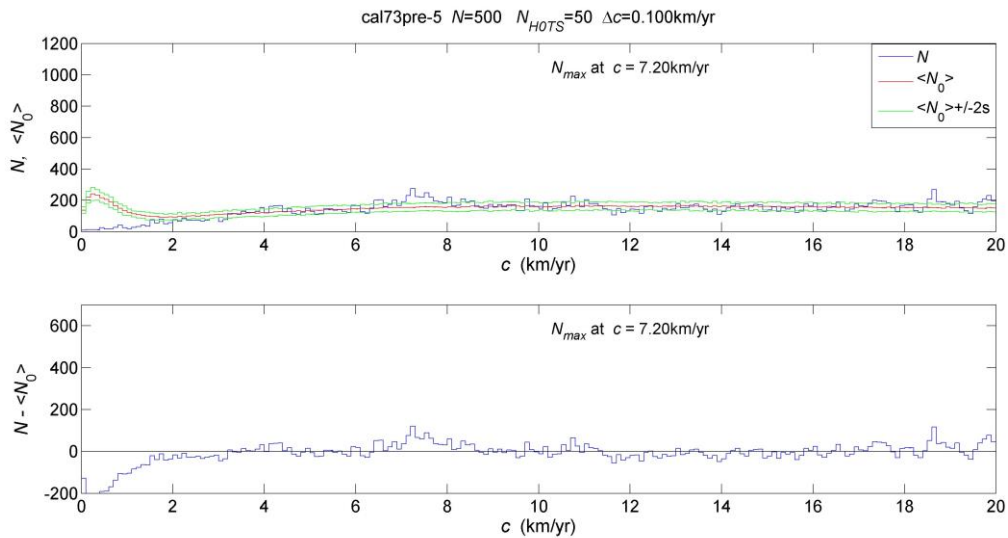


Figura 17. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 5 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 5 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

La ventana de tiempo 5, previa al sismo ocurrido en 1992, Cal73pre-5, contiene 500 eventos en el intervalo de tiempo, $t_1 = 1984.000$ y $t_2 = 1981.540634756$. De la misma manera que en la ventana 4, no fue posible identificar alguna clase con mayor concentración de eventos a diferencia de los picos localizados en las ventanas 1, 2 y 3. La distribución de eventos de la ventana 5 se muestra más o menos uniforme antes y después de la diferencia de distribuciones del sub-catálogo real y el promedio de las realizaciones de H0TS.

4.2.2 Velocidad elástica California 7.3 Post

La ventana de tiempo 1, posterior al sismo ocurrido en 1992, Cal73post-1, contiene 500 eventos en el intervalo de tiempo, $t_1 = 2000.000$ y $t_2 = 1998.377712445$.

No fue posible identificar alguna clase con mayor número de eventos en la ventana posterior al sismo de 1992 (pasada la mayor ocurrencia de réplicas). La mayor concentración de eventos se localiza en la clase que contiene la velocidad $c = 19.10$ km/yr pero no difiere en gran medida del número de eventos de las demás clases. La distribución se mantiene aproximadamente uniforme antes y después de la diferencia de distribuciones del sub-catálogo real y del promedio de realizaciones H0TS.

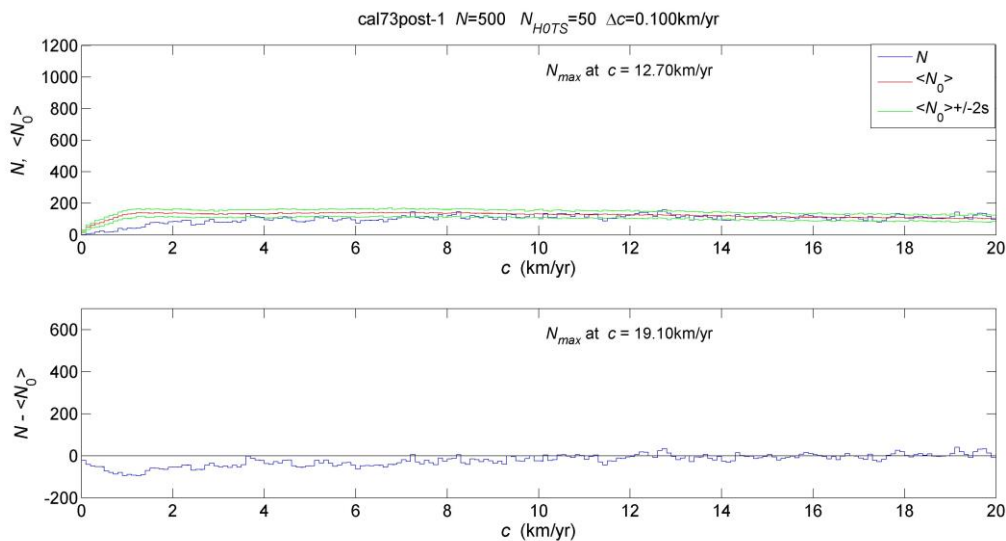


Figura 18. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 1 posterior al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos H0TS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 1 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos H0TS.

4.2.3 Velocidad difusiva California 7.3 Pre

Ventana 1

La ventana de tiempo 1, previa al sismo ocurrido en 1992, Cal73pre-1, contiene 500 eventos en el intervalo de tiempo, $t_1 = 1988.000$ y $t_2 = 1985.748800703$. No fue posible observar alguna clase predominante que indicara un significativo número de eventos emparentados. Se ve al inicio de la distribución un intervalo de clases con gran concentración de eventos, pero no hay un pico o clase que sobresalga de sus clases vecinas. Se muestra un incremento de eventos el cual llega a un máximo de casi 150 eventos y posteriormente decrece paulatinamente. Para velocidades más grandes, la distribución se mantiene aproximadamente uniforme.

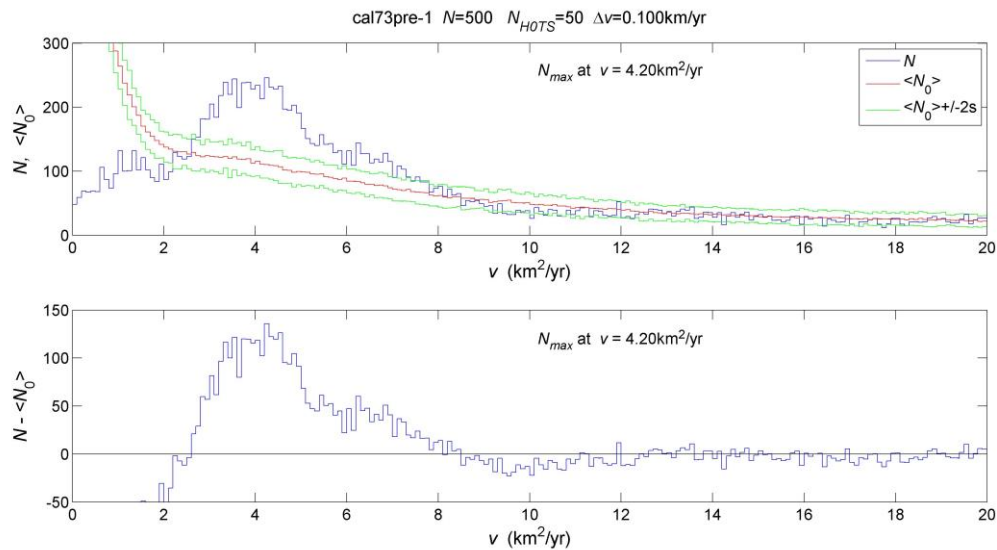


Figura 19. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

Ventana 2

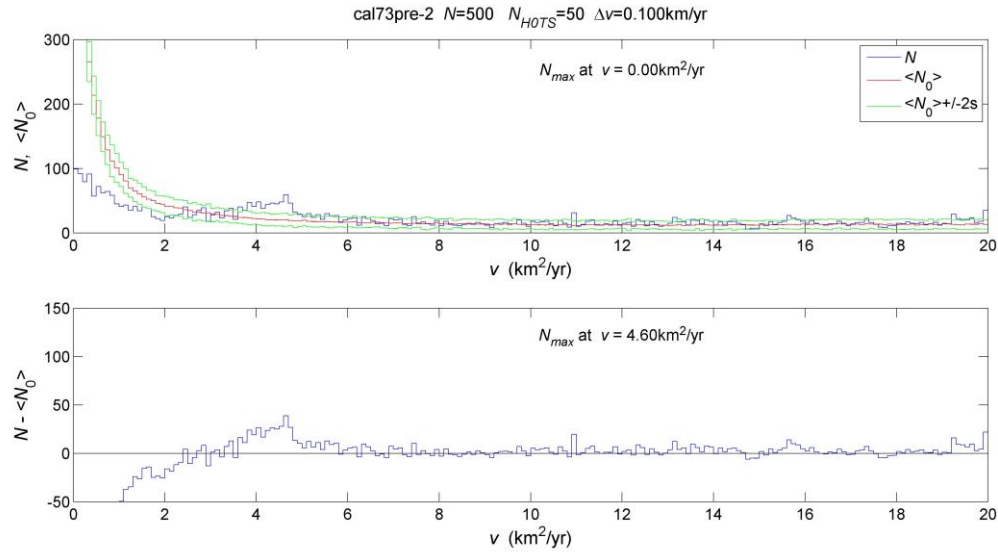


Figura 20. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 2 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 2 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

Ventana 3

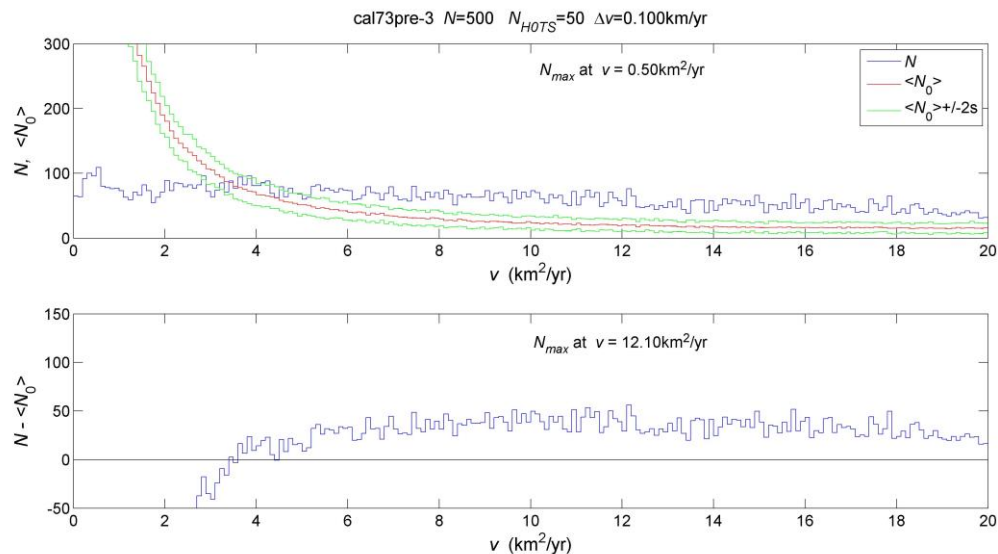


Figura 21. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 3 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 3 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

Ventana 4

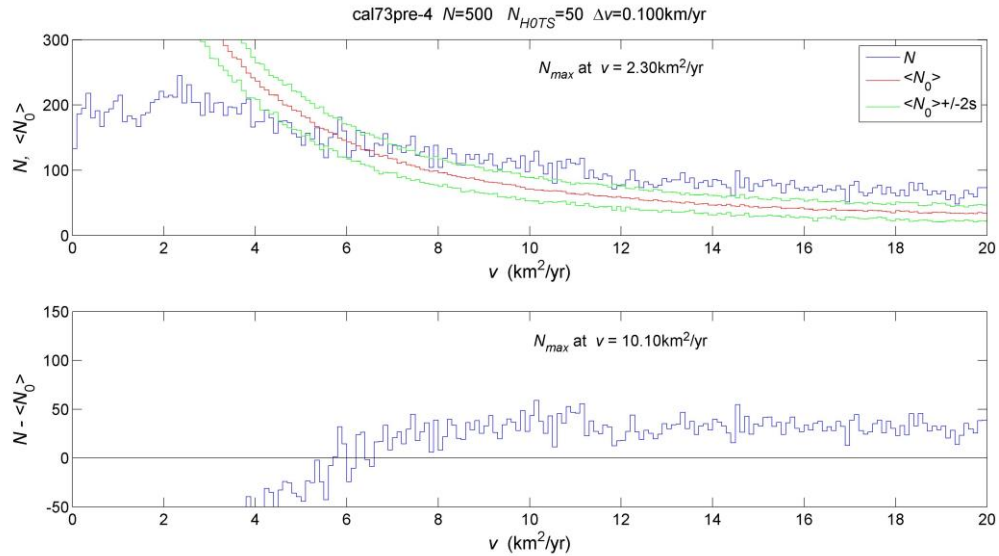


Figura 22. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 5 previa al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 5 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

Ventana 5

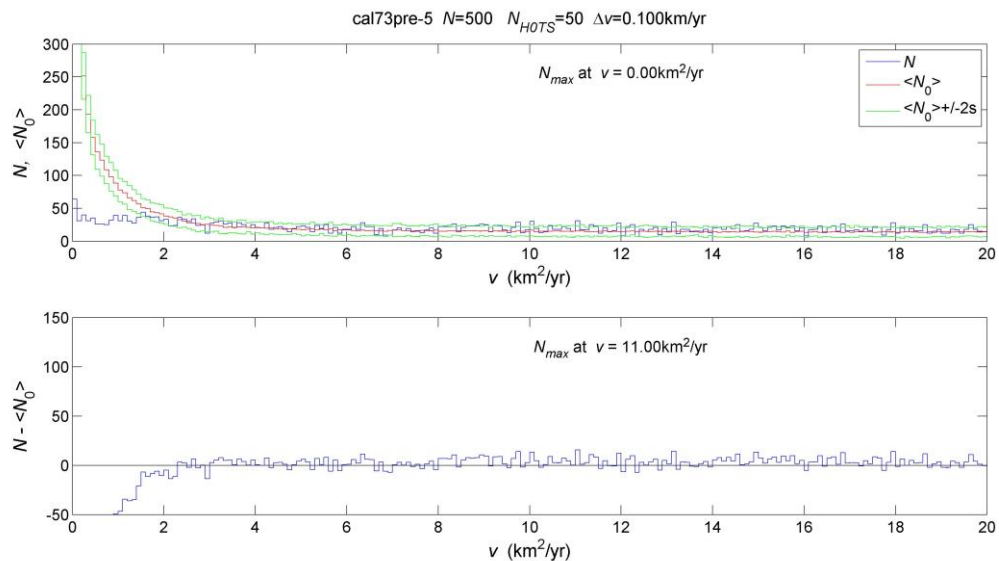


Figura 23. Análisis de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 5 previo al sismo de 1992 de California 7.3 y del promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS con y sin ruido, (arriba).

Distribución resultante de la diferencia de la distribución del análisis de velocidad del sub-catálogo de la ventana 5 y la distribución de velocidad del promedio de 50 catálogos sintéticos HOTS (abajo).

En las distribuciones de los análisis de velocidad difusiva de los sub-catálogos de las ventanas de tiempo 2, 3, 4 y 5 no fue posible identificar clases con significativo número de eventos emparentados. Después de restar las distribuciones de hipótesis nula, las distribuciones resultantes se mantienen aproximadamente uniformes, con valores por debajo de 100 eventos.

4.2.4 Velocidad difusiva California 7.3 Post

Ventana 1

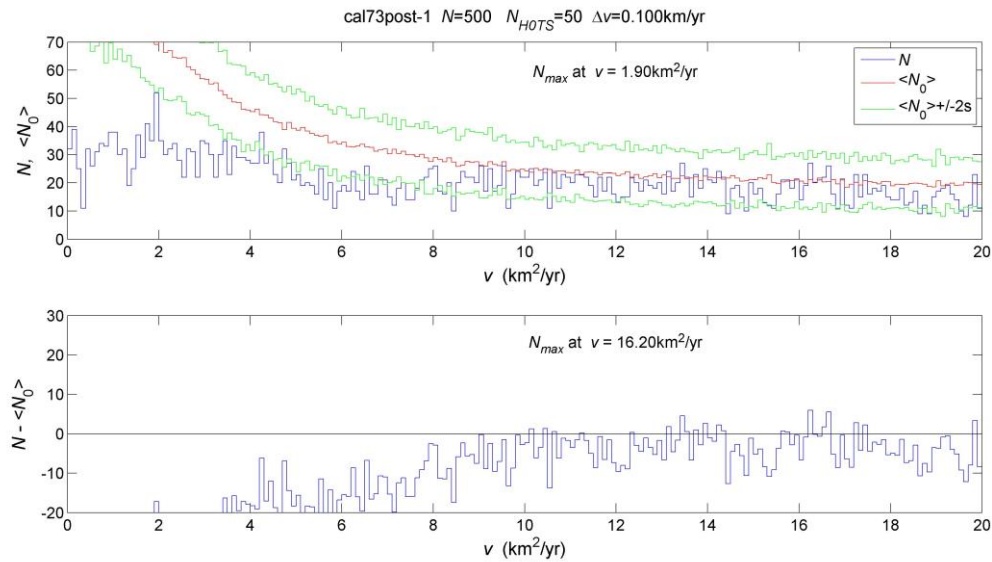


Figura 24. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 posterior al sismo de 1992 de California 7.3, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

4.3 Sub-catálogo California 7.2

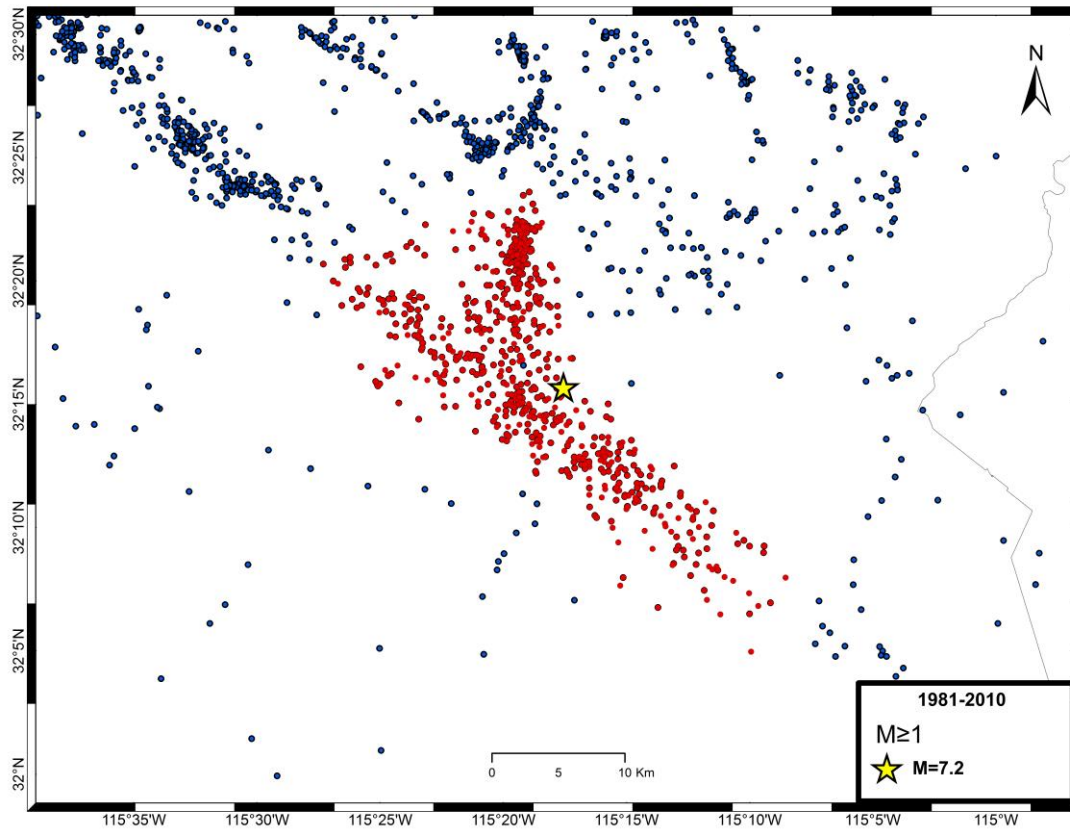


Figura 25. Mapa de ubicación de los eventos pertenecientes al sub-catálogo California 7.2.

El sub-catálogo, que llamaremos *California 7.2*, corresponde a la región del sismo de magnitud $M=7.2$, ocurrido en $t=2010.2573834$, en longitud -115.2927° , latitud 32.2617° y profundidad 16.510 km.

Debido al bajo número de eventos del catálogo en la región del sismo con $M=7.2$, seleccionamos únicamente una ventana de tiempo, previa a la ocurrencia del sismo; la ventana consta de 300 eventos. En la figura 26 se muestra gráficas con la distribución de eventos del catálogo (superior) y del momento sísmico (inferior), en el tiempo.

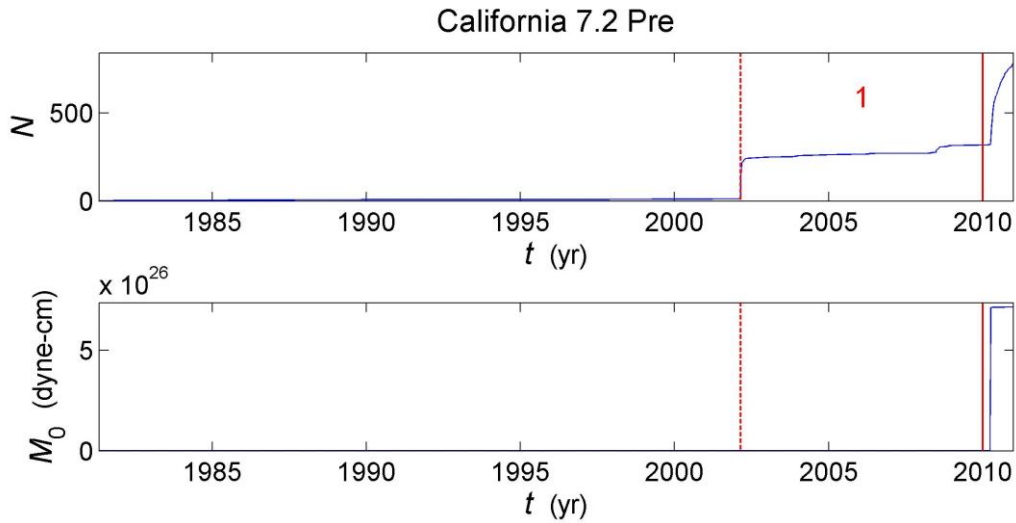


Figura 26. Número cumulativo de eventos, cumulativa de momento liberado y ventanas de tiempo de California 7.2.

4.3.1 Velocidad elástica California 7.2 Ventana 1

En el análisis de velocidades de la ventana 1, previa al sismo de 2010, Cal72pre-1, fue posible observar un alto pico localizado a la velocidad elástica $c = 1.80 \text{ km/yr}$. Es claro que el número de eventos en el pico es bastante mayor que el que podría esperarse de velocidades observadas por coincidencia, lo cual indica parentesco significativo entre los eventos del sub-catálogo. Para velocidades más grandes que 20 km/yr , la distribución se mantiene aproximadamente uniforme.

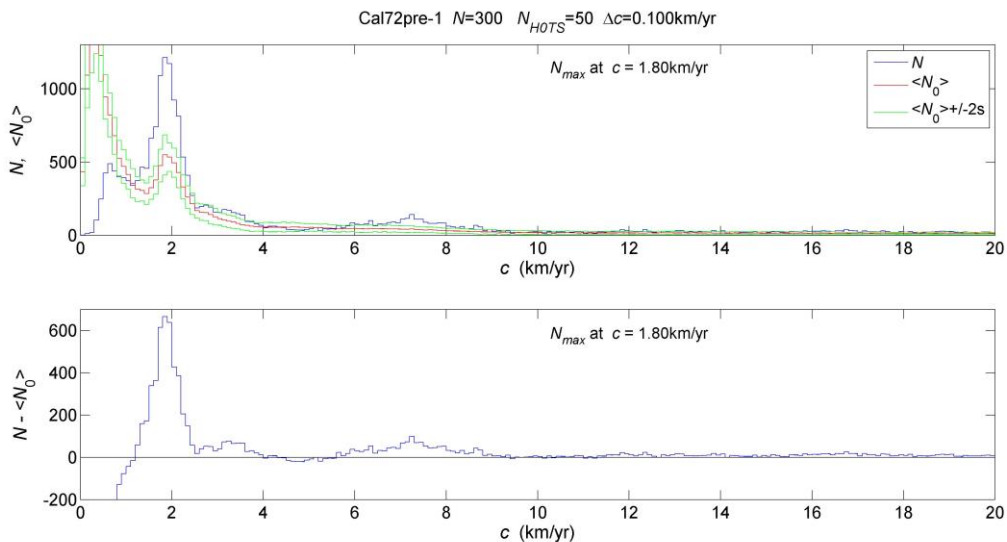


Figura 27. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 1 previa al sismo de

2010 de California 7.2, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

4.3.2 Velocidad difusiva *California 7.2*

Ventana 1

En el análisis de velocidades difusivas de la ventana 1, previa al sismo de 2010, Cal72pre-1, no fue posible identificar alguna clase con mayor concentración de eventos. La distribución se mantiene uniforme para pequeñas y grandes velocidades.

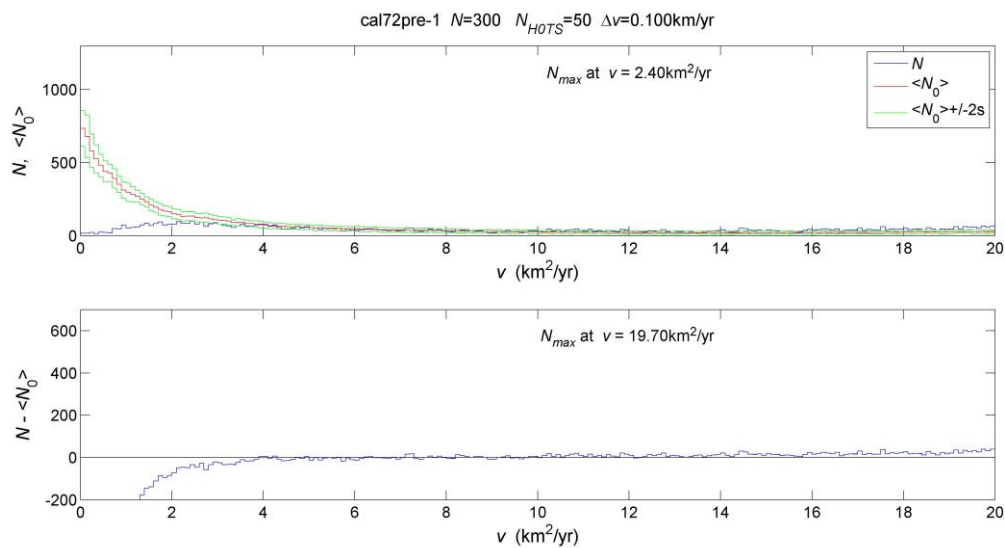


Figura 28. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 previa al sismo de 2010 de California 7.2, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

4.4 Sub-catálogo California 7.1

El sub-catálogo, que llamaremos *California 7.1*, corresponde a la región del sismo de magnitud $M=7.1$, ocurrido en $t=1999.7901574$, en longitud -116.2687° , latitud 34.5957° y profundidad 1.180 km.

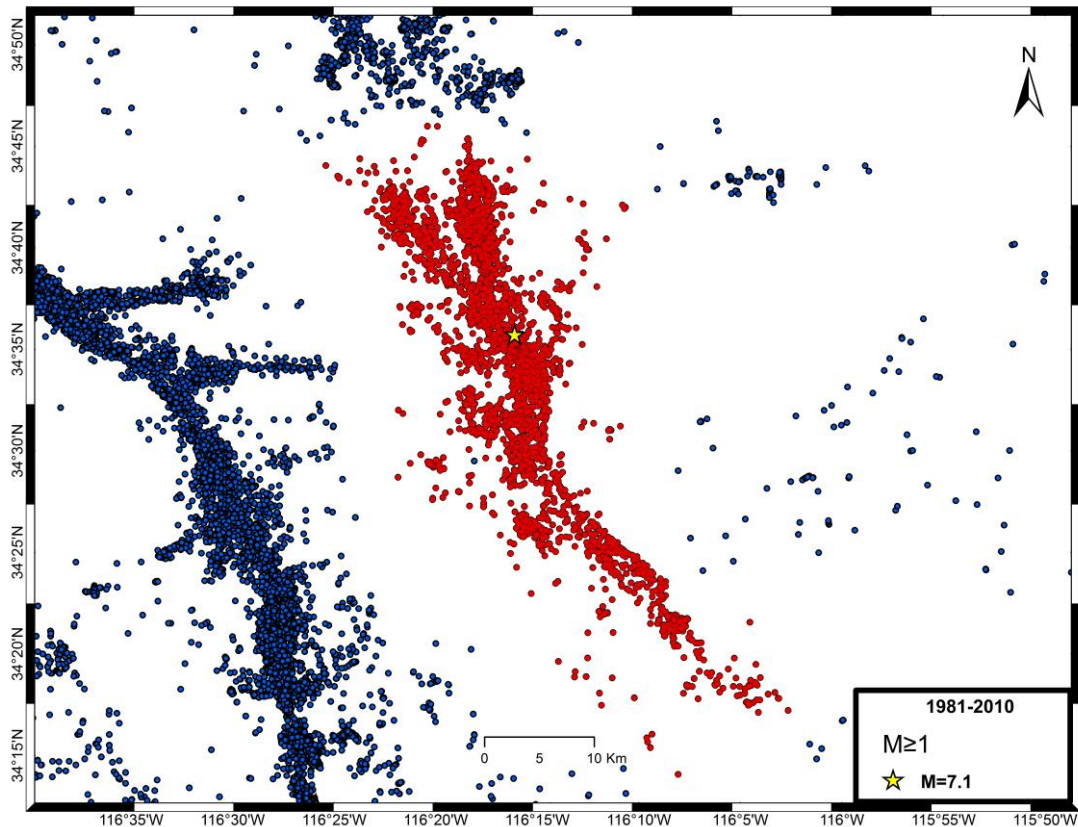


Figura 29. Mapa de ubicación de los eventos pertenecientes al sub-catálogo *California 7.1*.

Seleccionamos únicamente una ventana de tiempo, previa a la ocurrencia del sismo de 1999 debido al bajo número de eventos ocurridos en la región del sismo con $M=7.1$; la ventana consta de 100 eventos. En la figura 30 se muestra gráficas con la distribución de eventos del catálogo (superior) y del momento sísmico (inferior), en el tiempo.

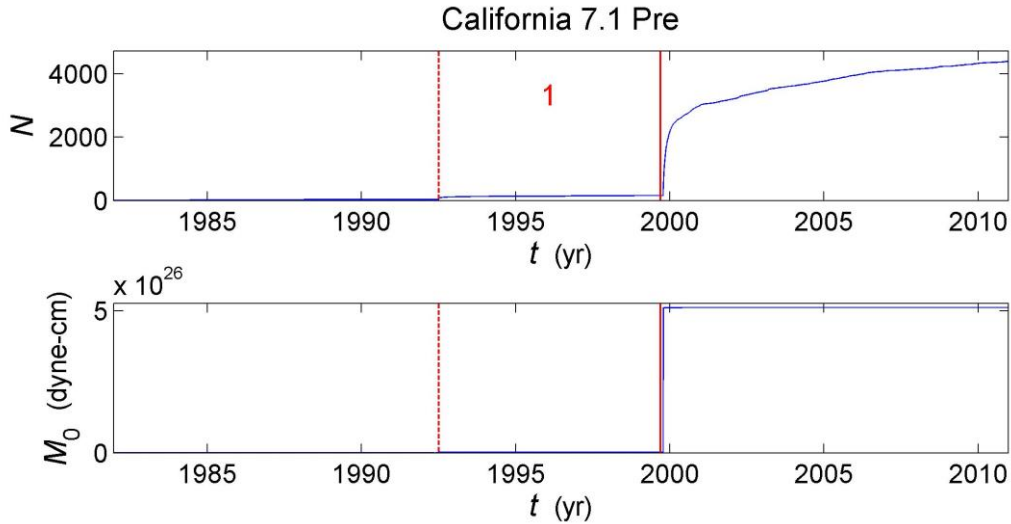


Figura 30 Número cumulativo de eventos, cumulativa de momento liberado y ventanas de tiempo de California 7.1.

4.4.1 Velocidad elástica California 7.1 Pre

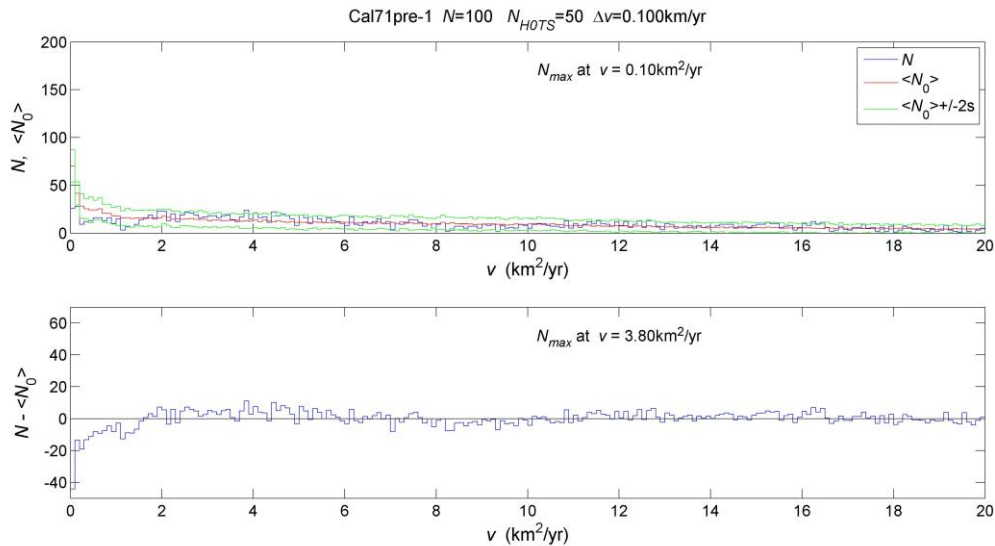


Figura 31. Arriba: Histograma de velocidades elásticas del sub-catálogo de la ventana 1 previa al sismo de 1999 de California 7.1, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

En el análisis de velocidades elásticas de la ventana 1 no fue posible identificar clases o algún pico con mayor número de eventos. La distribución de eventos se muestra uniforme antes y después de restar las realizaciones de HOTS.

4.4.2 Velocidad difusiva California 7.1 Pre

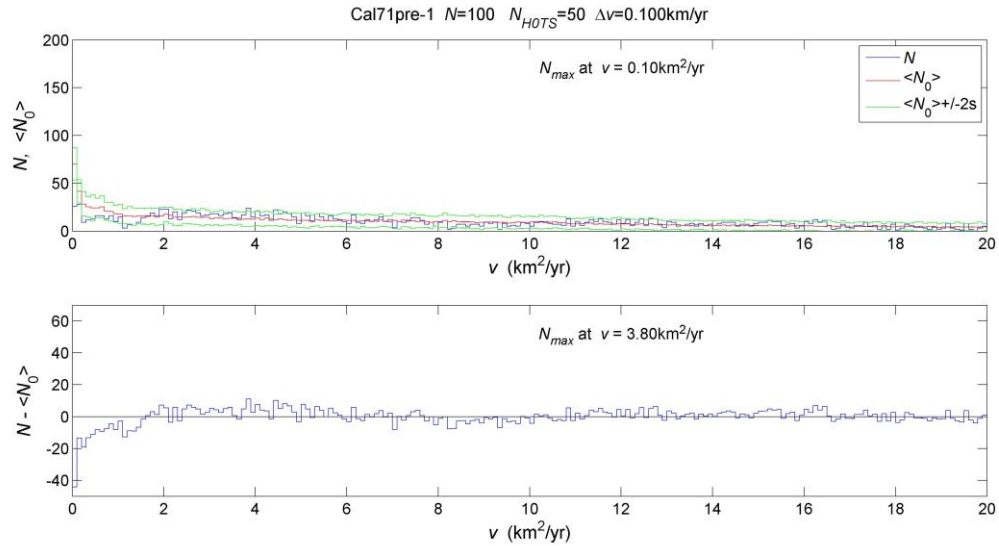


Figura 32. Arriba: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 previa al sismo de 1999 de California 7.1, promedio de 50 realizaciones de catálogos HOTS y dicho promedio más/menos 2 desviaciones estándar. Abajo: Histograma de velocidades difusivas del sub-catálogo de la ventana 1 menos el promedio de los 50 catálogos sintéticos HOTS.

En el análisis de velocidades difusivas de la ventana 1, previa al sismo de 1999, no fue posible identificar clases con significativo número de eventos emparentados. La distribución se mantiene constante para velocidades pequeñas y grandes. El número de eventos en las clases de la distribución está por debajo de 20.

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

Mediante la aplicación del método fue posible obtener un significativo porcentaje de relaciones de parentesco con velocidad elástica entre eventos previos a la ocurrencia de grandes terremotos, (dos años antes), pero no para periodos más grandes (6 años) o para periodos de tiempo pasada la mayor ocurrencia de réplicas. Los resultados de los análisis de velocidad elástica, para ventanas de tiempo previas a la ocurrencia de los sismos con $M=7.3$ y $M=7.2$ muestran un significativo número de eventos emparentados. Se observa el parentesco como una velocidad “real” con incidencia mayor que las de las velocidades aparentes entre los pares de sismos de cada muestra.

Los resultados de los valores de parentesco indican que existe algún proceso previo a la ocurrencia de grandes terremotos, el cual, especulamos, podría estar asociado con altos niveles de esfuerzo, ya que estos resultados sólo se observan en los análisis de velocidad elástica de las ventanas de tiempo 1, previas a los sismos con $M=7.3$ y $M=7.2$, que corresponden a periodos de tiempo de 2 años antes de que ocurra el terremoto, cuando se supone es más alto el nivel de esfuerzo. En las ventanas de tiempo 2 y 3 previas al sismo con $M=7.3$ fue posible identificar picos con alta concentración de eventos, pero la cantidad de eventos en ellos fue menor que en el pico localizado en la ventana 1. En la ventana previa al sismo con $M=7.1$ no fue posible identificar alguna velocidad real, cabe mencionar que el número de eventos en dicha ventana fue muy reducido.

Para velocidades difusivas, la existencia de velocidades reales es más difícil de afirmar porque sólo en la ventana 1, previa al sismo de $M=7.3$ fue posible identificar gran concentración de eventos pero no hubo una clase que predominara significativamente con respecto a clases vecinas, la cual pudiera indicar la existencia de una velocidad real con la cual estén emparentados los eventos.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

El método permitió identificar velocidades reales, con las cuales se encuentran emparentados los eventos de pequeña y mediana magnitud, previos a la ocurrencia de grandes sismos.

Los resultados de los análisis de velocidades elásticas de las ventanas 1 previas a los sismos con $M = 7.3$ y $M = 7.2$ sugieren que al estar emparentados los eventos, estos no ocurren de forma aleatoria antes de grandes sismos y podrían disparar la ocurrencia de eventos posteriores en condiciones de alto nivel de esfuerzo. Es posible que no encontráramos velocidades reales en los análisis de velocidades de la ventana de tiempo previa al sismo con $M = 7.1$ debido al bajo número de eventos en el sub-catálogo.

En condiciones de bajo nivel de esfuerzo, es decir, posterior a un terremoto y pasada la mayor ocurrencia de réplicas, el comportamiento de la sismicidad de fondo, es autónomo, ya que no se identificó velocidades reales que relacionaran la ocurrencia de sismos.

Sólo se encontró parentesco entre eventos con velocidades elásticas. Los resultados obtenidos para velocidades difusivas no son significativos para el catálogo del sur de California.

La importancia del método radica en que el parentesco entre eventos de pequeña y mediana magnitud puede ser indicativo de alto esfuerzo y, por tanto, puede ser de utilidad para el pronóstico sísmico, lo cual implica la reducción de pérdidas ante la ocurrencia de un terremoto. Aunado a la alerta de otros precursores sísmicos, confiere un nivel de confianza más alto en el pronóstico de sismos de gran magnitud ya que al identificar un área con velocidad real, es decir, con parentesco entre los eventos de la sismicidad de fondo, puede explorarse la región circundante para estimar qué tan grande es la región de esfuerzos y estimar el posible tamaño de un futuro sismo.

Debido a que es posible que el premonitor se comporte como otros premonitores y no ocurra sí y sólo sí va a ocurrir un sismo grande, es recomendable utilizarlo en conjunto con otros premonitores para apoyar pronósticos realizados por otros métodos.

Ya que el método depende de la calidad y extensión de los datos, es necesario probarlo con catálogos con buena localización hipocentral para reforzar su efectividad

como posible precursor sísmico y determinar su grado de confiabilidad y posibles regiones o contextos tectónicos de aplicación.

Determinar la existencia de velocidad real o parentesco entre eventos fue el principio del método; los resultados de este estudio permiten proponer trabajos a futuro que incluyen caracterizar las familias de eventos y determinar qué información adicional puede extraerse de ellas y, posteriormente, buscar algún modelo físico para explicar el fenómeno para la transmisión de información e interacción entre eventos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bak, P., Tang, C. (1989) Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *J. Geophys. Res.* 94, 15635-15637.

Bolt, B. A. (1981) *Terremotos*. Reverté. S. A., Barcelona, España.

Cornell, C. A. (1968) Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.* 58, 1583-1606.

Hauksson, E. (2010) Spatial Separation of Large Earthquakes, Aftershocks, and Background Seismicity: Analysis of Interseismic and Coseismic Seismicity Patterns in Southern California. *Pure and Applied Geophysics*. 167 (2010), 979-997.

Hauksson, E. (2011) Crustal geophysics and seismicity in southern California. *Geophys. J. Int.* 186, 82-98.

Hauksson, E., Yang, W., Shearer, P. (2012) Waveform Relocated Earthquake Catalog for Southern California (1981 to June 2011). *Bull. Seism. Soc. Am.* 102 (5), 2239-2244.

Hutton, L., Woessner, J., Hauksson, E. (2010) Seventy-seven years (1932-2009) of earthquake monitoring in southern California. *Bull. Bull. Seism. Soc. Am.* 100 (2), 423-446.

Jones, L., Hauksson, E. (1997) The seismic cycle in southern California: Precursor or response?. *Geophysical Research Letters*. 24 (4), 469-472.

Lomnitz, C., Nava, F. (1983) The predictive power of seismic gaps. *Bull. Seism. Soc. Am.* 73, 1815-1824.

Lomnitz, C., Rosenblueth E. (1976), *Seismic Risk and Engineering Decisions*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Países Bajos.

National Research Council of the National Academies (2011) *National Earthquake Resilience: Research, Implementation and Outreach*. The National Academies Press, Washington, D.C.

Nuannin, P., Kulhánek, O. (2012) A study of *b*-value Precursors Applied to the Andaman-Sumatra Región. *Journal of Earth Science and Engineering*. 2(2012), 116-188.

Reiter, L. (1991) *Earthquake hazard analysis: issues and insights*. Columbia University Press, New York, USA.

Scholz, C. H. (1990) The Mechanics of Earthquakes and Faulting. Cambridge University Press, New York, USA.

Southern California Earthquake Center, California Institute of Technology. [En línea]: <http://scedc.caltech.edu/significant/chron-index> [Consulta: junio 2017].

Stein, S., Wysession M. (2003) An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. Blackwell Publishing, Malden, USA.

Tape, C., Muse, P., Simons, M., Dong, D., Webb, F. (2009) Multiscale estimation of GPS velocity fields. Geophys. J. Int. 179, 945-971.

Turcotte, D. (1992) Fractals and chaos in geology and geophysics. Cambridge University Press.

United States. Materials Management Service (1983) Southern California OCS (Outer Continental Shelf) oil and gas lease sale, 1984: environmental impact statement. Northwestern University.

Usgs United States Geological Service. Pacific Coastal and Marine Science Center. [En línea]: <https://walrus.wr.usgs.gov/earthquakes/cencal/P-NAP> [Consulta: junio 2017]

