

5. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En sismología observacional donde no es posible tener réplicas experimentales reales que permitan una estimación apropiada del error, es necesario evaluar la incertidumbre de las estimaciones usando el conocimiento del fenómeno, conjugado con técnicas estadísticas apropiadas. Aquí entra a desempeñar un papel importante la simulación estadística. Con la implementación y desarrollo de una simulación, se pretende dar una estimación puntual de los parámetros desconocidos del modelo que simula el sistema de interés, proporcionando una idea de la precisión de la estimación, mediante el error cuadrático medio o mediante intervalos de confianza.

Como ya ha sido mencionado, este trabajo fue llevado a cabo con datos obtenidos por el Observatorio Sismológico del SurOccidente durante un periodo de mas de 15 años de observación constante del Sur Occidente del país con su red regional. De manera alterna se usó información obtenida de otra fuente, que corresponde a una red de observación sismológica privada, que será denominada red local. De esta manera se mira el problema desde dos ópticas diferentes permitiendo en algunos casos la comparación de resultados entre dos tipos de redes diferentes: red regional vs. red local.

5.1. Errores debidos a la configuración de red

De acuerdo con los trabajos realizados por Gupta et al. (1973) y García (1986) se implementó una simulación Monte Carlo con el objetivo de analizar los efectos de la configuración actual de dos redes independientes sobre los errores al estimar parámetros de ubicación espacio-temporal de posible sismicidad en el área de interés. A continuación se clasifican los diferentes pasos realizados para llevar a cabo el estudio de simulación.

5.1.1. Definición del problema

El problema consiste en determinar, con base en una red de observación sismológica pre-existente, la calidad de la estimación de los parámetros hipocentrales y el tiempo de origen para un área de interés, teniendo como factor de influencia la configuración de la red, es decir, la ubicación en conjunto de las estaciones sismológicas. El área está definida de la siguiente manera:

- Red Regional, se determinó como región de interés, el área cubierta por las estaciones, que va desde 77.5W 75.0W en longitud y desde 1.5N 6.0N en latitud.
- Red local, de la misma manera se determinó como área de interés la comprendida entre 1.07E a 0.96W en longitud y 14.496N a 14.586N en latitud.

5.1.2. Datos iniciales

Para el análisis de cada red, la información de entrada no variable son las coordenadas de las estaciones sismológicas y un modelo de velocidades plano, es decir un valor promedio de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas para cierto rango de profundidad.

- Red Regional. Velocidad de propagación promedio de la onda P entre 0 y 30 km de profundidad: 6.5 km/s. Las coordenadas de las estaciones son las siguientes

Estación	Latitud(y, en grados)	Longitud(x, en grados)	elevación(z, en km)
HOB	4.388	-76.146	1.152
ANC	3.515	-76.867	0.540
HOQ	3.468	-76.634	2.220
DIA	3.291	-76.197	1.520
PUR	2.337	-76.398	4.260
SAL	2.967	-76.695	1.430
CLM	3.881	-76.563	1.480
AZU	3.685	-76.139	3.750
PEI	4.861	-75.723	2.093
TAT	5.127	-75.997	2.220
SIL	2.685	-76.337	3.210

- Red local. Velocidad de propagación promedio de la onda P entre 0 y 30 km de profundidad: 6.5 km/s. Las coordenadas de las estaciones son las siguientes

Estación	Latitud(y, en grados)	Longitud(x, en grados)	elevación(z, en km)
LAA	-1.0331	14.5185	0.671
LBB	-1.0063	14.5369	0.384
LCC	-0.9827	14.5483	0.390
LDD	-1.0212	14.5281	0.396
LEE	-1.0174	14.5419	0.505
LFF	-1.0418	14.5309	0.627
LGG	-1.0174	14.5230	0.398
LHH	-1.0050	14.5635	0.597
LJJ	-1.0476	14.5372	1.031
LKK	-1.0414	14.5182	0.418

5.1.3. Establecimiento del modelo de simulación

Como se planteó en la sec. 3.1.1, pág. 19 y en la sección 4, a partir de la teoría de propagación de ondas y de los valores absolutos de velocidad en la región de estudio, la relación teórica

entre tiempos de arribo (datos) y las coordenadas espacio temporales del foco (determinados por un grupo de parámetros) permiten calcular los tiempos de viaje de las diferentes ondas sísmicas –por ejemplo la onda P– a cada una de las estaciones. El tiempo de viaje de una onda en función de la distancia recorrida (D_i) y de la velocidad de propagación de la onda en cada capa de la tierra (v_P), y se define como

$$t_i(p) = \frac{D_i}{v_P} = \frac{\sqrt{(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + (Z - z_i)^2}}{v_p}$$

donde $v_P = 6,5$ es la velocidad promedio de propagación de la onda P para profundidades entre 0 y 30 km, x_i, y_i y z_i son longitud, latitud y elevación de la i -ésima estación, $t_i(P)$ es el tiempo de recorrido de la onda P (directa) desde X, Y, Z -coordenadas espaciales del sismo- hasta la i -ésima estación.

De la ecuación anterior, puede formularse la siguiente ecuación lineal para el error en la determinación de las coordenadas espacio temporales del foco,

$$(t_i + e_i - \delta_t)^2 = \frac{(x_i - [X + \delta_x])^2 + (y_i - [Y + \delta_y])^2 - [z_i + (Z + \delta_z)]^2}{v_p^2}$$

donde $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ y δ_t son los errores asociados a cada una de las coordenadas epicentrales y e_i es el error cometido al identificar el tiempo de arribo a la i -ésima estación. Este error se asume que tiene distribución normal con media cero y desviación estándar de 0.02 para las lecturas de fases en la Red Regional y de 0.01 para las fases leídas en la red local.

Asumiendo que los errores son pequeños, por tanto sus potencias sucesivas tienden a cero, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones,

$$\begin{pmatrix} -(x_1 - X) & -(y_1 - Y) & -(z_1 - Z) & D_1 v_p \\ -(x_2 - X) & -(y_2 - Y) & -(z_2 - Z) & D_2 v_p \\ \vdots & & & \\ -(x_n - X) & -(y_n - Y) & -(z_n - Z) & D_n v_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \\ \delta_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_1(D_1 v_p) \\ e_2(D_2 v_p) \\ \vdots \\ e_n(D_n v_p) \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

que en forma matricial puede escribirse como

$$Gm = d$$

Los parámetros de interés están contenidos en el vector $m = [\delta_x \delta_y \delta_z \delta_t]$, y corresponden a la incertidumbre al estimar los parámetros hipocentrales $\chi = (X, Y, Z, T)$ asumiendo un error de lectura y para la configuración de red dada.

5.1.4. Ejecución de la simulación

La implementación del algoritmo de simulación se llevó a cabo usando *Matlab*, que es un lenguaje de alto nivel orientado a operaciones con matrices, con una amplia gama de librerías

disponibles –*toolbox*– en diferentes áreas como estadística (MathWorks, 1997), ingeniería (Etter, 1998), ciencias de la tierra (Middleton, 2000) y cuenta además con excelentes herramientas para la elaboración de gráficas (Nakamura, 1997). La simulación, llevada a cabo mediante el método Monte Carlo, puede considerarse un procedimiento sencillo en el sentido que el proceso sólo tiene un estado, por lo tanto no es necesario definir un tipo de caminata o recorrido entre estados. Sin embargo, la simulación es compleja, en el sentido que es una simulación múltiple (se realizan tantas simulaciones como sismos teóricos hayan en cada malla), usando un algoritmo polinomial de tres niveles. Por ejemplo, el tiempo de ejecución para la Red Regional que consta de 4500 sismos con generación de 800 números aleatorios es de aproximadamente 15 horas en un Athlon de 800 MHz.

Se usó la función $[X,Y] = \text{meshgrid}(x,y)$ para generar una malla bidimensional definida por las coordenadas del área de interés. Para la red local, cuyo cubrimiento es local con un área de interés relativamente pequeño (aproximadamente 50 km N-S y 60 km E-W), se generó una malla con separación de 0.02 grados (Fig. 5.1). Para la red de SW, cuyo cubrimiento local

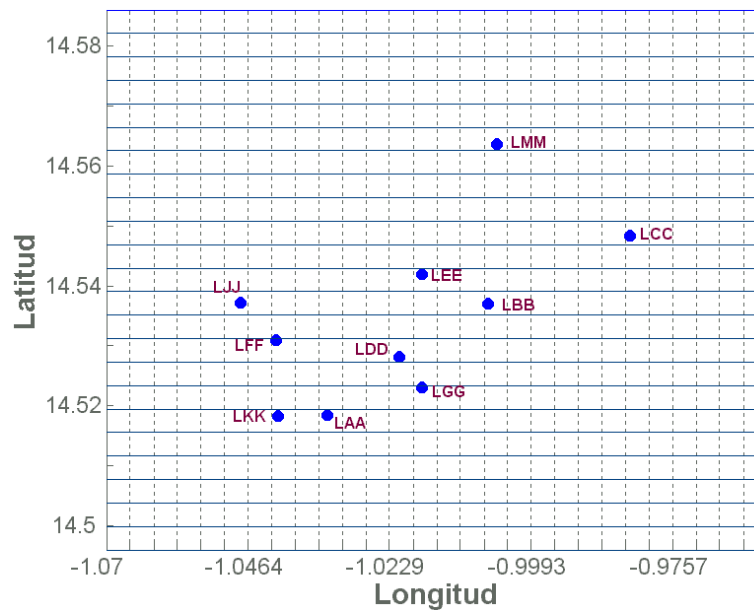


Figura 5.1: Malla para simulación de sismos y distribución de las estaciones, Red local

involucra un rectángulo de alrededor de 270 km (2.5 grados) E-W y 500 km (4.5 grados) N-S, se generó una malla con separación de 0.05 grados (Fig. 5.2, los nombres de las estaciones se pueden ver en la Fig. 2.9). Los nodos en cada malla representan la ubicación de los sismos teóricos que deberán ser localizados por la red existente. Así, para el área cubierta por la Red Regional, se tiene una malla de 50x90 para un total de 4500 sismos teóricos. Para la red local, se tiene una malla de 27x23 para un total de 621 sismos teóricos.

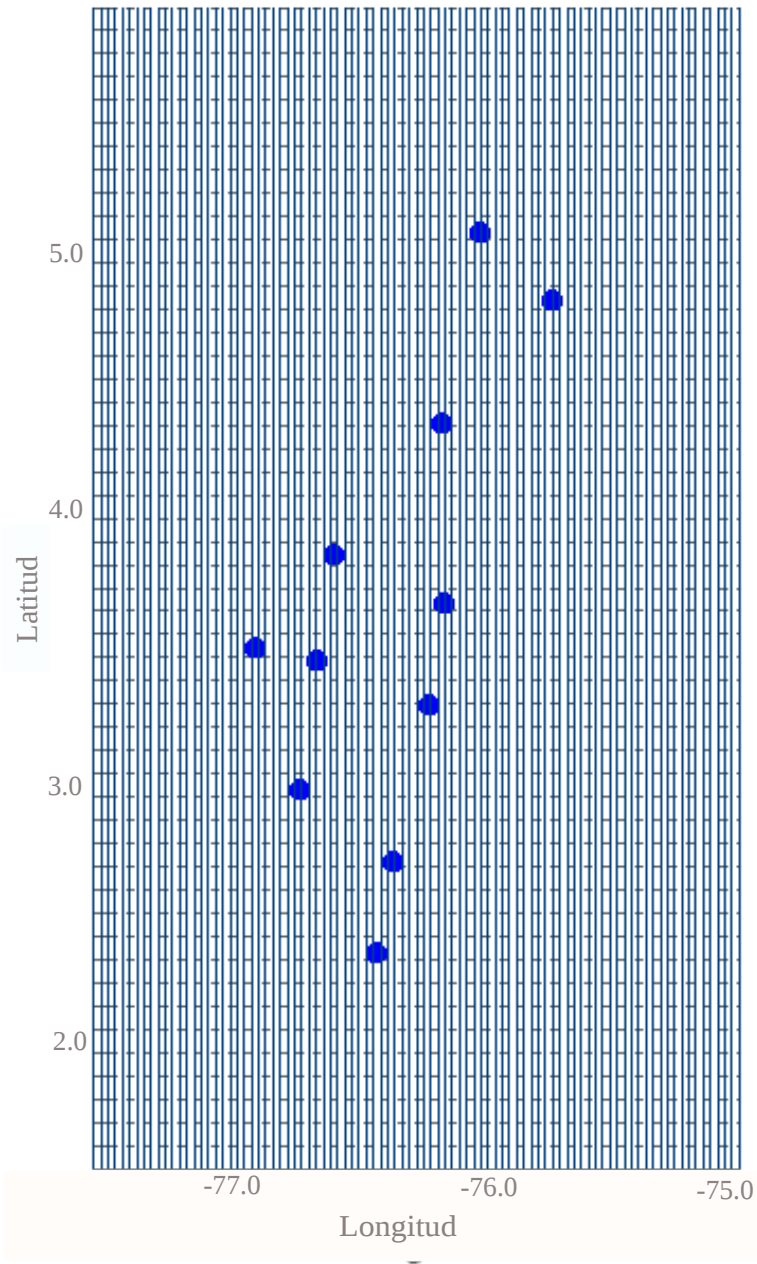


Figura 5.2: Malla para simulación de sismos y distribución de las estaciones, Red Regional

La generación de números aleatorios con distribución normal se llevó a cabo mediante la función $R = \text{normrnd}(\mu, \sigma, l, n)$. Esta función genera números aleatorios distribuidos normalmente con parámetros μ y σ , los escalares l y n son el número de líneas y columnas de la matriz R , donde l es el número de estaciones y n es el número de veces que se repite la simulación para cada sismo. μ y σ representan la media y la desviación estándar de la distribución de los errores de lectura, los cuales son influenciados por factores como la tasa de muestreo (mayor en la red local), ruido eléctrico (mayor en la red Regional), rango dinámico de los equipos de

adquisición (12 bit para red OSSO, 16 bit para red local), entre otros. Para la Red Regional se escogieron errores con media 0 y desviación estándar 0.02 y para la red local se escogieron errores con media 0 y desviación estándar 0.01.

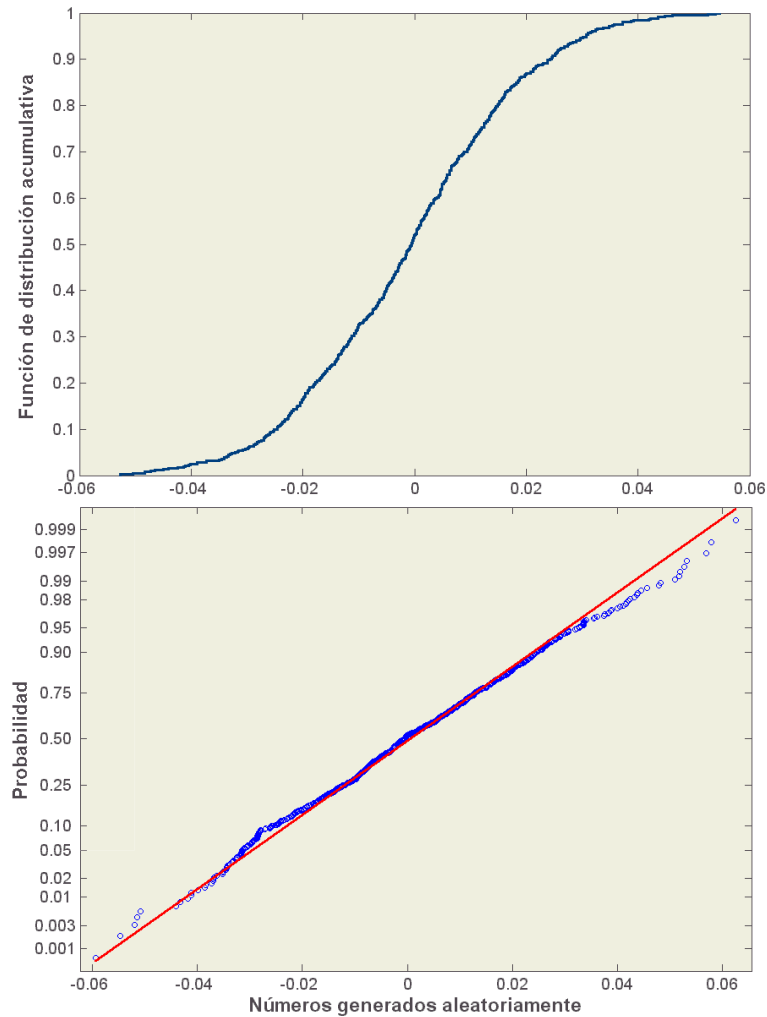


Figura 5.3: Prueba de normalidad. Superior: función de distribución acumulada para la muestra generada aleatoriamente. Inferior: gráfica de probabilidad normal

Los números aleatorios obtenidos de esta manera tienen los siguientes parámetros: para la red de SW: media = 0.000065, desviación estándar = 0.0046, para la red local: media = 0.0003696, desviación estándar = 0.0024. A esta serie de números generados se les realizaron las pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov y la prueba Jarque-Bera (descritas en la sección 3.1.3.2), para determinar estadísticamente si realmente tienen distribución normal con los parámetros anteriormente definidos. El resultado de las dos pruebas no mostraron evidencia para concluir que las dos series de errores no tienen distribución normal, ni para afirmar que la media de ambos grupos de datos es diferente de cero. A continuación se presentan dos gráficas (Fig. 5.3) que muestran que los números generados aleatoriamente tienen

distribución de probabilidades normal.

La solución del sistema lineal $Gm = d$ se llevó a cabo usando el método de regresión lineal múltiple, mediante el uso de la función $m = regress(d, G)$, la cual hace ajuste mediante mínimos cuadrados de d en G , para obtener los valores de m . La función *regress* obtiene la minimización de la función objetivo resolviendo el sistema de ecuaciones normales mediante descomposición de la matriz G en una matriz triangular superior (R) y una matriz ortogonal (Q) haciendo $G = QR$ (Ver sec. 3.1.2.2).

5.1.5. Ejecuciones de prueba y validación del modelo

Para verificar el desempeño del algoritmo se diseñó una red teórica (Fig. 5.4), conformada por 13 estaciones equiespacidamente distribuidas de manera simétrica con respecto a los límites del área. El área de prueba es un cuadrado de 5 grados por cada lado, dividida por una malla con separaciones de 0.05 grados; de esta manera se obtuvieron 10000 sismos teóricos para analizar.

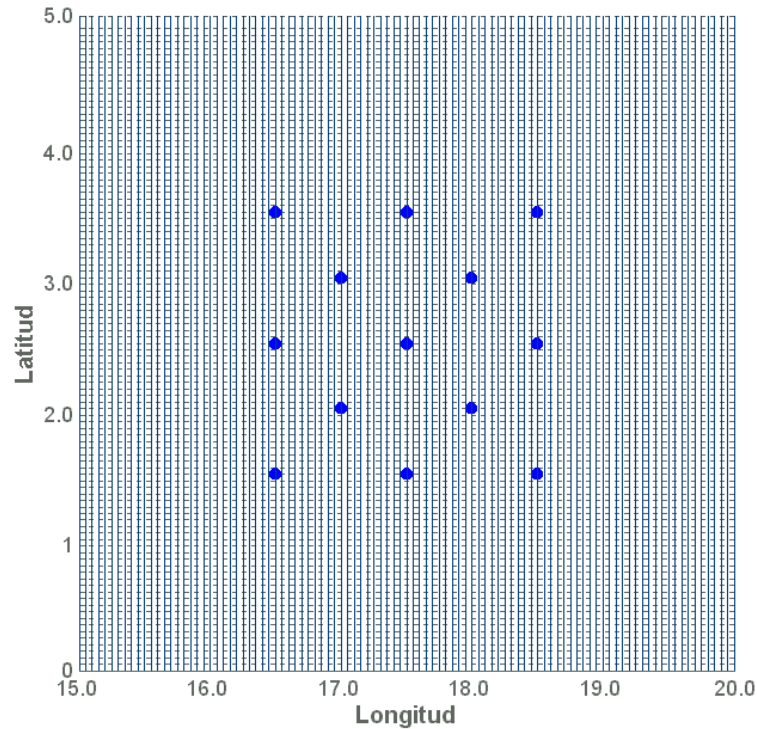


Figura 5.4: Red teórica para ejecución de prueba. Los puntos azules corresponden a las estaciones sismológicas

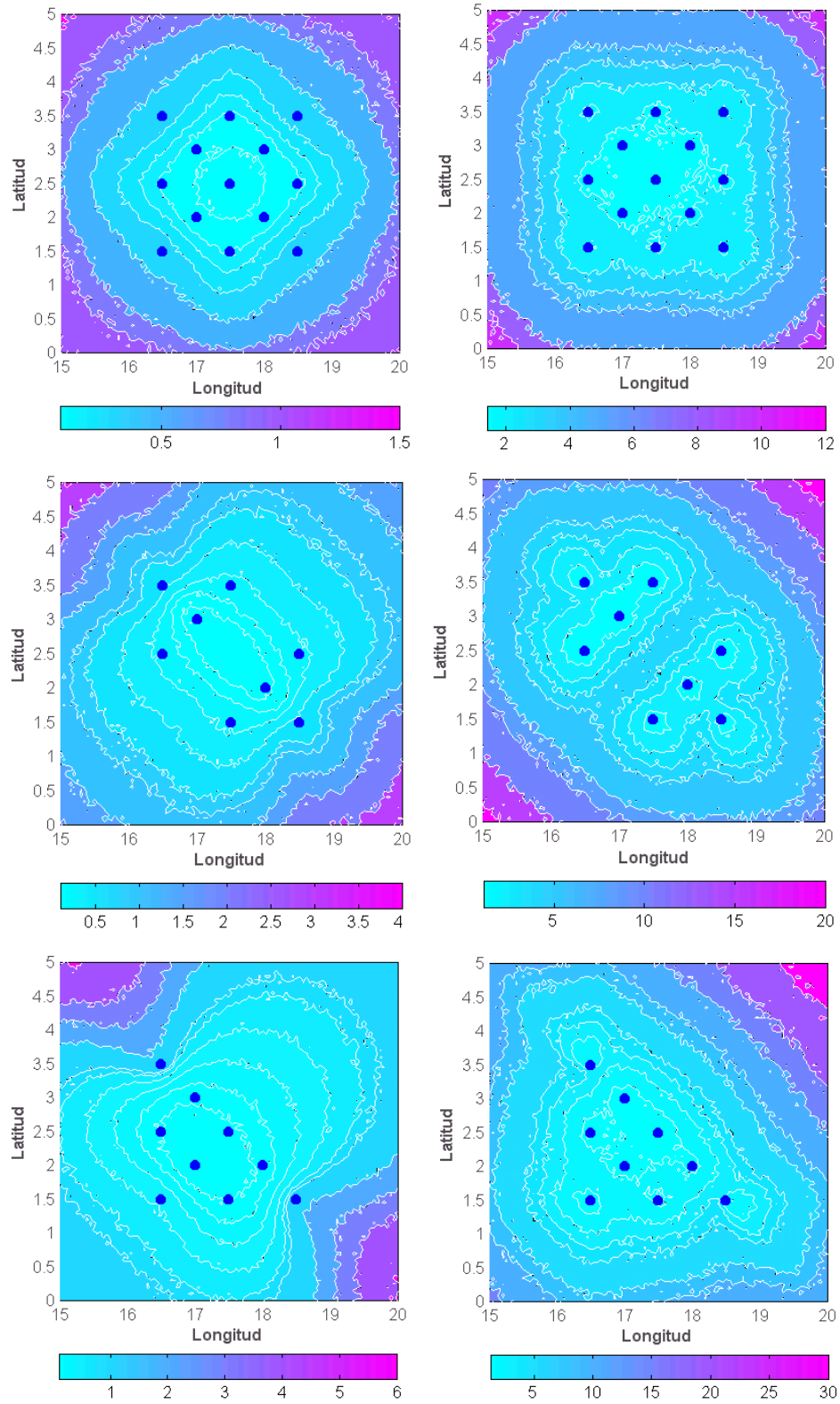


Figura 5.5: Distribución del error en longitud-latitud (izq.) y profundidad (derecha) para las diferentes configuraciones de una red hipotética

Con esta red se llevó a cabo la simulación, realizando 30 repeticiones. Los resultados obtenidos (Fig. 5.5, superior) muestran distribución simétrica de los errores en latitud-longitud y profundidad, de acuerdo a lo esperado para una red completamente simétrica como esta.

Posteriormente, se suprimieron 5 estaciones a la red inicialmente propuesta realizando nuevamente la simulación con el mismo número de repeticiones anterior; los resultados obtenidos con esta nueva red corresponden a la gráfica del centro de la figura 5.5.

Finalmente se suprimieron las 4 estaciones de la esquina superior derecha, obteniendo una red asimétrica, sin cubrimiento de 1/4 del área total; los resultados obtenidos para la estimación de la incertidumbre en los parámetros longitud-latitud y profundidad corresponden a la gráfica inferior de la figura 5.5.

Los resultados obtenidos al llevar a cabo la verificación del algoritmo de simulación son satisfactorios en el sentido que muestran cómo la simetría desaparece con la disminución de estaciones, y cómo los errores aumentan cuando hay dispersion o disminución de las mismas.

5.1.6. Diseño del experimento de simulación

El número de muestras del experimento de simulación n determina la precisión de las estimaciones, por lo tanto es necesario tomar un tamaño de muestra suficientemente grande, para de esta manera obtener estimaciones con cierta precisión. Como se planteó en la sección 3.2.2 (pág. 32), la ecuación para determinar el tamaño de muestra está dada por

$$(2z_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{\epsilon}})^2 \leq n \quad (5.2)$$

aquí, la precisión está determinada por ϵ la magnitud del máximo error permisible y por α el nivel de significancia.

Con el objetivo de determinar el número de muestras, la simulación fue realizada con una muestra de tamaño 30, el cual es un tamaño suficiente para obtener una estimación inicial aproximada del error estándar. A partir de esta simulación se obtuvieron los siguientes estadísticos para el parámetro de mayor interés en este caso: los errores relacionados con la determinación conjunta de latitud y longitud δ_{xy} ,

Red	Parámetro	Mínimo (km)	Máximo (km)	Promedio (km)
OSSO	desv. estándar	0.130	10.5	1.06
	Media	0.070	5.60	0.55
Local	desv. estándar	0.076	2.80	0.42
	Media	0.044	1.40	0.23

El tamaño de muestra puede ser determinado con base en la máxima desviación estándar del

parámetro de mayor interés; pero dado que en este caso particular, los valores máximos se encuentran ubicados en los extremos de la malla, siendo valores muy alejados del promedio, se tomará en cuenta el valor promedio de las varianzas máximas de la matriz. Estos valores son, desviación estándar de los máximos para la Red Regional = 2.2 y desviación estándar de los máximos para la red local = 0.9.

El nivel de confianza $(1 - \alpha)$ fue de 0.95 y ϵ se escogió de 0.1 para la Red Regional y de 0.05 para la red local. Con estos valores se obtuvo un tamaño de muestra mínimo de 744 para la Red Regional y de 249 para la red local. Se realizaron 800 y 300 repeticiones de la simulación respectivamente.

5.1.7. Pasos para ejecución de la simulación

Dado que el objetivo de la simulación es determinar, con base en una red existente, las incertidumbres en la determinación de los parámetros hipocentrales (tiempo de origen, latitud, longitud y profundidad) fue necesario determinar el número y la ubicación de los sismos teóricos para cada región de observación (sección 5.1.4); después fue necesario definir el número de repeticiones de cada simulación para conseguir estimaciones a un nivel de confianza y con cierta dispersión aceptables (sección 5.1.6). La ejecución de la simulación se lleva a cabo de la siguiente manera,

1. Para cada sismo hipotético, a partir de sus parámetros predefinidos y de las coordenadas de las estaciones, se construye el sistema de ecuaciones descrito en la página 61 (Ec. 5.1), adicionando un error aleatorio en el tiempo teórico de arribo de la onda a cada estación.
2. Se construyen las ecuaciones normales y se resuelve el sistema para obtener la desviación del evento teórico con respecto a sus valores absolutos (δ_x , δ_y , δ_z y δ_t). Estos valores son guardados temporalmente.
3. Los pasos 1 y 2 se repiten n veces para el mismo sismo (800 veces para la Red Regional, 300 veces para la red local), adicionando cada vez un diferente grupo de errores aleatorios. De esta manera se obtienen n estimaciones de cada δ para ese sismo.
4. A partir de las todas las estimaciones, se calcula el promedio para δ_x , δ_y , δ_z y δ_t y la respectiva desviación estándar (S_{δ_x} , S_{δ_y} , S_{δ_z} y S_{δ_t}). La incertidumbre conjunta en latitud-longitud δ_{xy} se determina de $(\delta_{xy} = (\delta_x + \delta_y)/2)$ y la respectiva desviación estándar $S_{\delta_{xy}}$ se obtiene de $(S_{\delta_{xy}} = \sqrt{S_{\delta_x}^2 + S_{\delta_y}^2})$
5. Los pasos anteriores se repiten con todos los sismos generados teóricamente para cada red (4500 para la Red Regional y 621 para la red local).

5.1.8. Análisis de los resultados de la simulación

5.1.8.1. Simulación Monte Carlo para la Red Regional

Las siguientes gráficas muestran la estimación Monte Carlo de las incertidumbres $\delta_{xy}, \delta_z y \delta_t$ que resultan del error en las lecturas de tiempos de arribo al estimar los parámetros hipocentrales latitud-longitud, profundidad y tiempo de origen con la red actual del OSSO, para sismos que ocurran en el área comprendida entre las longitudes 77.5W y 75.0W y desde las latitudes 1.5N y 6.0N, con profundidades de 5, 30 y 60 km. Se asume que los sismos son suficientemente grandes para que la llegada de la onda P pueda ser medida en todas las estaciones con una precisión definida por la desviación estándar de 0.02 segundos.

Si el tiempo que se demora la onda P en recorrer de manera directa una distancia de 1 km son 6.5 segundos ($v_p = 6,5$ km/s), y el error en la lectura de la llegada de la onda P a cada estación tiene desviación estándar de 0.02 segundos, es posible determinar una relación entre estos dos valores que permitan un punto de comparación entre el error en tiempo y el error en distancia δ_D , este valor puede ser calculado de $\delta_D = v_p * \sigma_t = 0,13km$.

Sismos teóricos ocurridos a 5 km de profundidad Las figuras 5.6 y 5.7 son el resultado de la simulación realizada con la configuración actual de la Red Regional para sismos que ocurran a una profundidad de 5 km.

La gráfica de incertidumbre en la determinación del tiempo de origen (Fig. 5.6, izquierda) muestra que para sismos que ocurren a 5 km de profundidad en el área ubicada en el centro de la red, cubierta por 7 estaciones con separación promedio entre ellas mayor a 50 km, la incertidumbre al determinar el tiempo de origen tiene menor precisión que la alcanzada en la lectura de los tiempos de arribo (0.03 segundos), valor superior a la desviación estándar del error que se asume se comete al identificar los tiempos de arribo.

En cuanto a la determinación de la profundidad focal (Fig. 5.6, derecha), los resultados se ven mas influenciados por la distancia entre estaciones. En el área en el que en promedio se conservan distancias de alrededor de 50 km entre ellas se tiene un error en la determinación epicentral de 1 km, teniendo errores hasta de 15 km en el margen superior izquierdo del rectángulo, en la dirección opuesta a la orientación de la configuración de la red.

En cuanto al error que se comete al determinar las coordenadas epicentrales de sismos que ocurren a 5 km de profundidad en el área cubierta por el rectángulo (Fig. 5.7, izquierda), puede deducirse que estos parámetros son los mas fuertemente afectados por la configuración de red, teniendo un error de 0.3 km para el área cubierta por 8 estaciones (72 % de la red), que corresponde a mas de dos veces el valor obtenido anteriormente para δ_D .

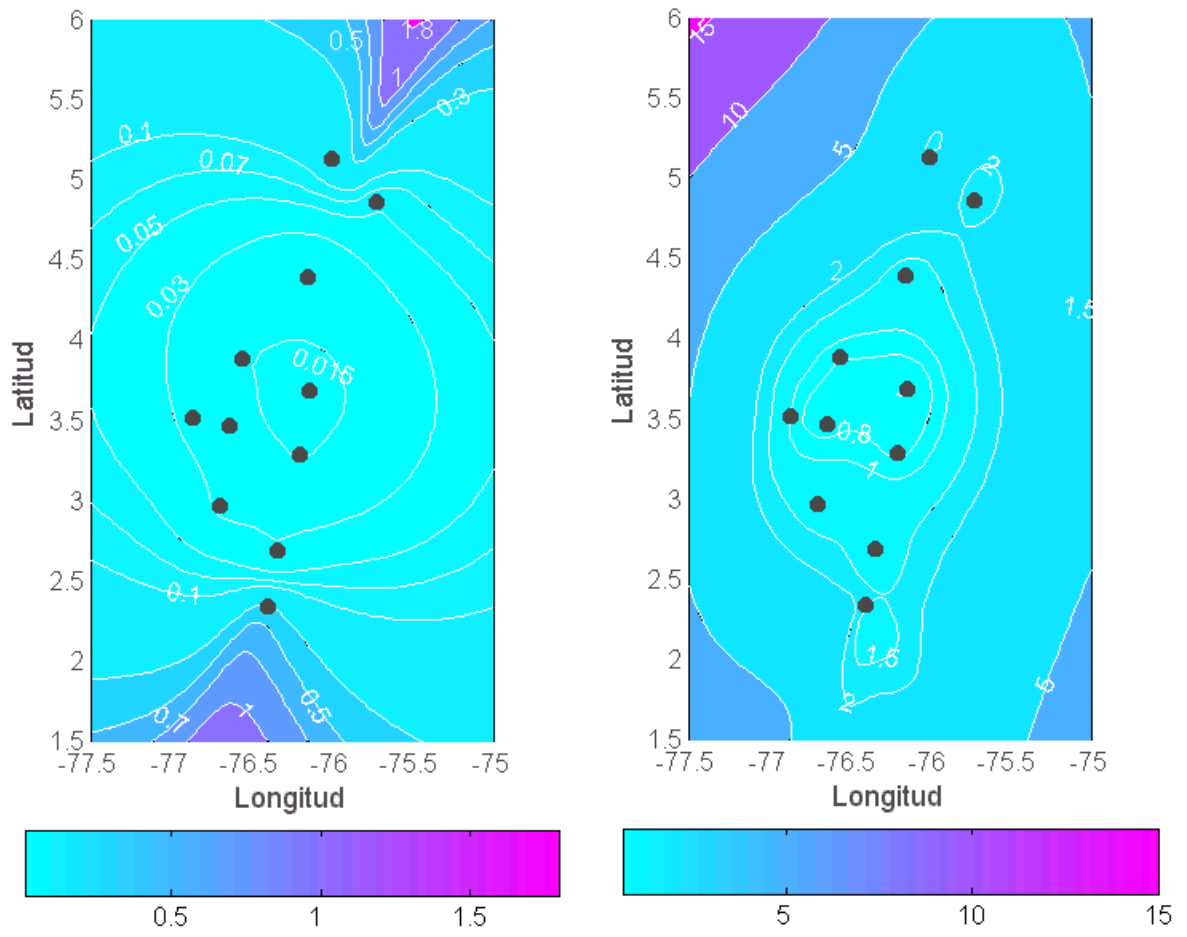


Figura 5.6: Distribución del error en la determinación de tiempo de origen (izquierda) y profundidad (derecha) para sismos teóricos ocurridos a 5 km de profundidad.

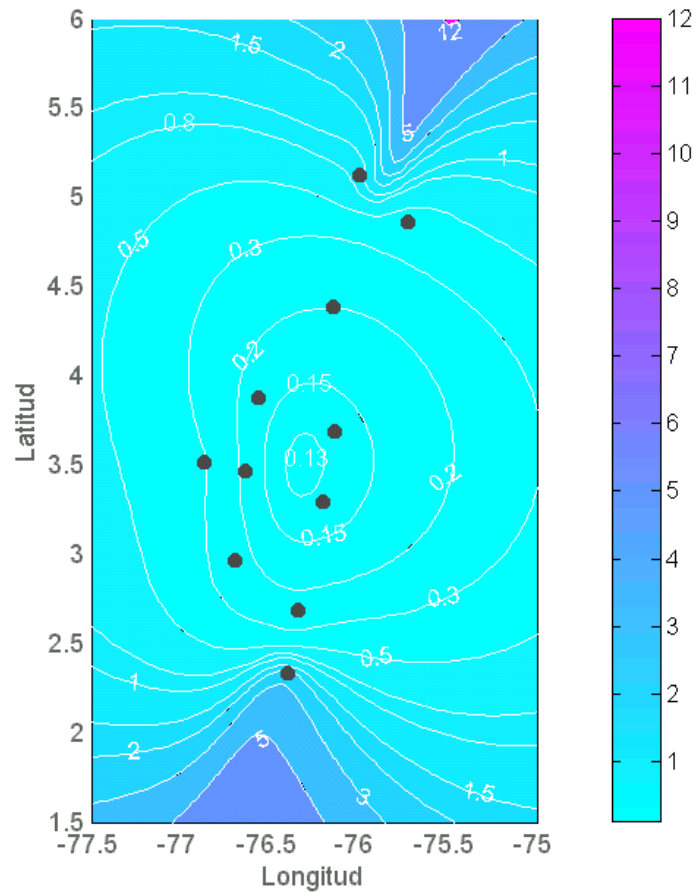


Figura 5.7: Distribución del error en la determinación de latitud-longitud (izquierda) y desviación estándar de este error (derecha) para sismos teóricos ocurridos a 5 km de profundidad.

Sismos teóricos ocurridos a 30 y 60 km de profundidad La sismicidad asociada a fallas generalmente se presenta a profundidades superficiales inferiores a los 30 km, pero dado que el área monitoreada por la Red Regional presenta actividad sísmica relacionada con la zona Wadati-Benioff (profundidades cercanas a los 50 km) se realizaron dos simulaciones adicionales, una para sismos que ocurren a 30 km y otra para sismos que ocurren a 60 km de profundidad. El resultado de la simulación llevada a cabo para determinar la incertidumbre en la determinación de parámetros hipocentrales de sismos con profundidad de 30 km con la configuración actual de la Red Regional se muestra en las figuras 5.8 y 5.10, mientras que la simulación de sismos que ocurren a una profundidad de 60 km proporciona la distribución de errores que se muestra en las figuras 5.9 y 5.11.

Las curvas de contorno correspondientes a la incertidumbre en la determinación del tiempo de origen para sismos ocurridos a 30 y 60 km (Figs. 5.8 y 5.9, izquierda) tienen un comportamiento similar al visto para sismos que ocurren a 5 km de profundidad, siendo sólo levemente superior para sismos que ocurren a la profundidad mayor (60 km). En cuanto a

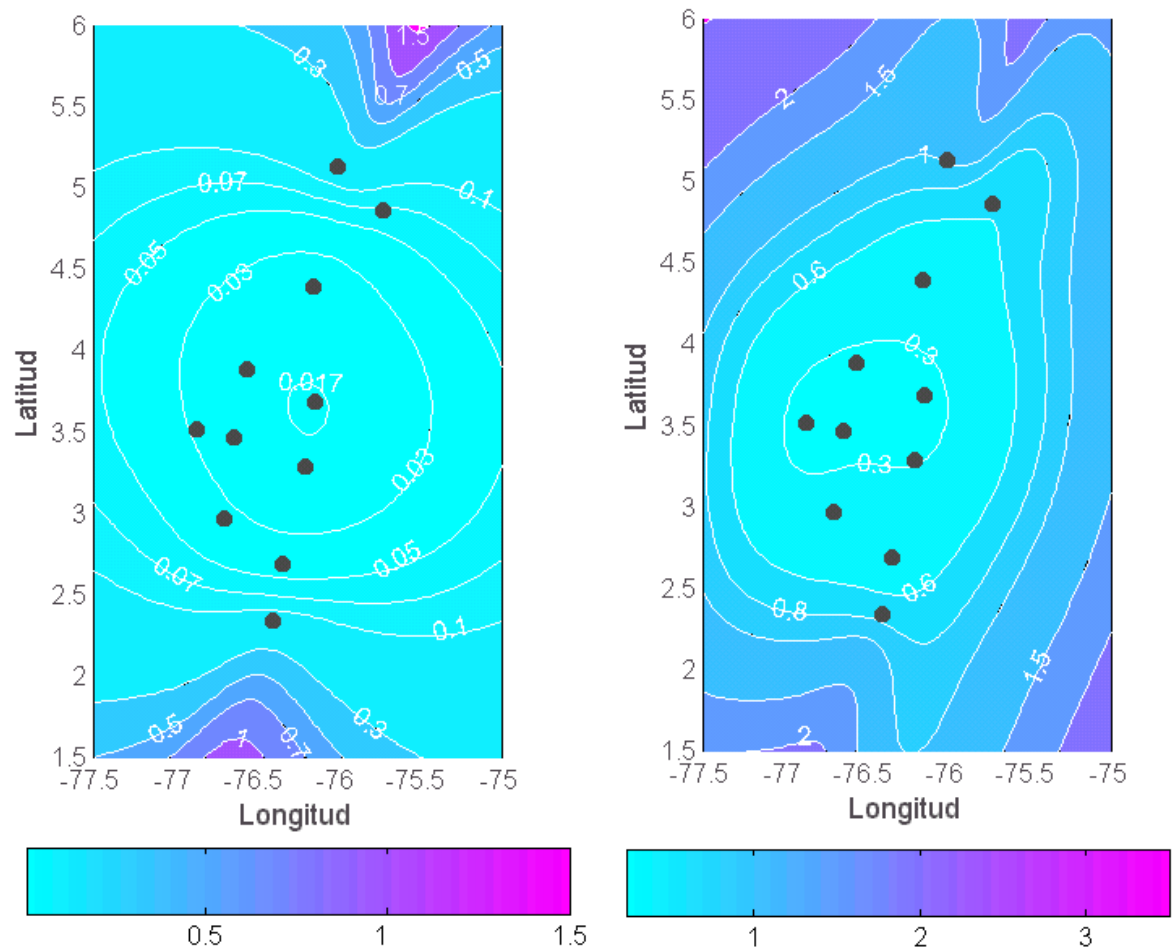


Figura 5.8: Distribución del error en la determinación de tiempo de origen (izquierda) y profundidad (derecha) para sismos teóricos ocurridos a 30 km de profundidad.

las gráficas que muestran la distribución espacial de incertidumbres en la estimación de la profundidad focal para sismos a profundidades de 30 y 60 km (Figs. 5.8 y 5.9, derecha) se ve una disminución de los errores con respecto a la figura 5.6 (izquierda); esto se debe a que una red puede observar con menor error sismos que ocurran hasta 0.87 de la distancia entre estaciones, y la Red Regional con separación promedio de 50 km entre estaciones es mas eficiente monitoreando sismos que ocurran a profundidades alrededor de los 40 km, y dado que la distancia mínima entre dos estaciones de esta red es de 26 km (entre ANCC y HOQC), el error en la determinación focal de sismos menores a 10 km involucra desde ya un mayor error en su determinación. Comparativamente, la incertidumbre en la determinación de las tres profundidades focales para el área limitada por la dos estaciones mas lejanas (TATC, al norte y PURC, al sur) varía de 3 km para sismos superficiales a 0.8 km para sismos que ocurran a 60 km de profundidad.

De igual manera como resultaron las curvas de incertidumbre en la determinación de las

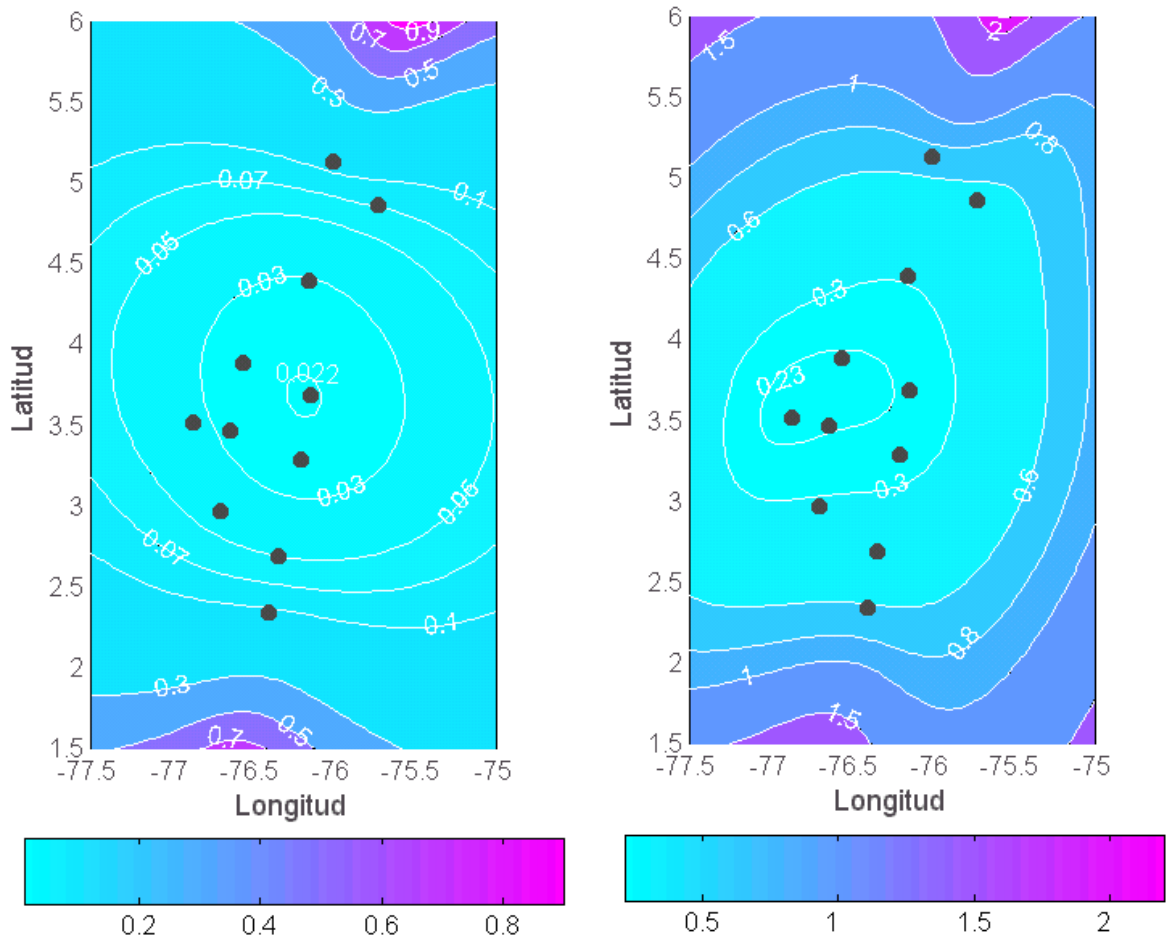


Figura 5.9: Distribución del error en la determinación de tiempo de origen (izquierda) y profundidad (derecha) para sismos teóricos ocurridos a 60 km de profundidad.

coordenadas geográficas latitud y longitud para la simulación de sismos que ocurren a 5 km de profundidad, en las simulaciones para sismos a 30 y 60 km de profundidad (Figs. 5.10 y 5.11, izquierda) en el centro de la red se obtuvieron contornos que agrupan las mismas estaciones y cubren áreas idénticas con los mismos valores para el error. Los valores de los contornos en los límites de la red en cambio, disminuyen para eventos de profundidades superiores. El error en la determinación de coordenadas epicentrales para sismos que ocurren a profundidades de 30 y 60 km en el centro de la red, que corresponde al área cubierta por 8 estaciones, es de 0.3 km, valor que equivale a mas de dos veces el valor calculado para δ_D ; este mismo valor se obtuvo para sismos superficiales (10 km) con la diferencia que en ese caso la curva cubre un área mas grande.

De acuerdo a los resultados anteriores hay varias componentes importantes que se pueden destacar,

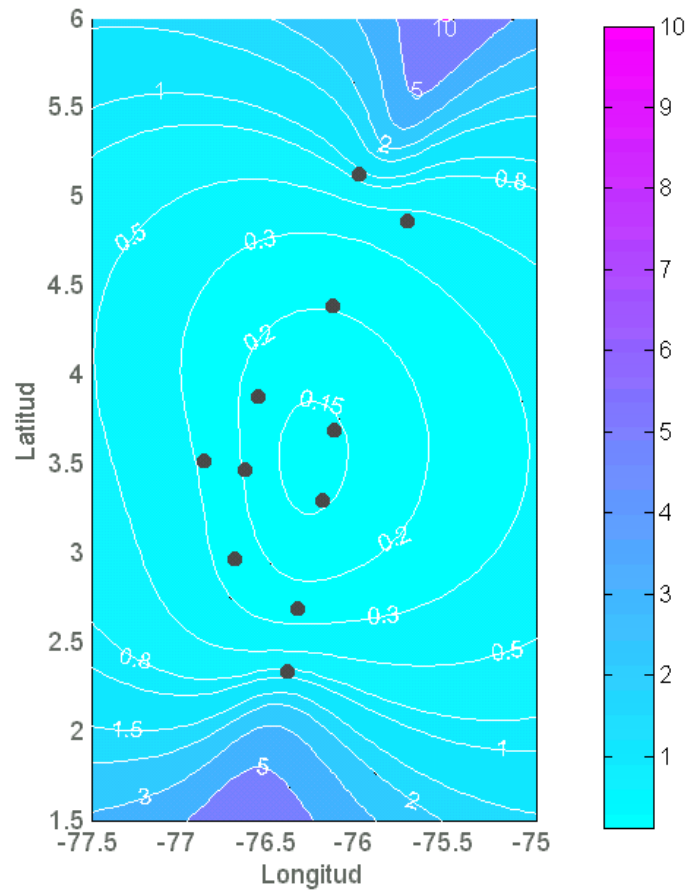


Figura 5.10: Distribución del error en la determinación de latitud-longitud (izquierda) y desviación estándar de este error (derecha), para sismos teóricos ocurridos a 30 km de profundidad

1. Los valores de δ_T , en los tres casos anteriores, son simétricos con respecto a los semi ejes de la red, aunque en dirección N-S los errores empiezan a aumentar a medida que la dispersión entre estaciones aumenta, mientras que en dirección E-W con el mismo ángulo de la orientación de la distribución de la red, los valores de error se conservan pequeños para áreas mas grandes.
2. La distribución de valores para δ_Z está en relación directa con la orientación o distribución de las estaciones de la red, la distancia entre estaciones y la profundidad focal.
3. La distribución de valores de δ_{XY} muestran cómo la precisión en la determinación de las coordenadas hipocentrales está influenciada por la configuración de las estaciones. Se observa que una configuración como la de la Red Regional, con estaciones alineadas N-S, las cuales suministran información redundante, no son adecuadas para proporcionar una cobertura suficiente en esta dirección, mientras que pocas estaciones ubicadas en sentido E-W podrían ser las que realmente aportan a la solución del problema.

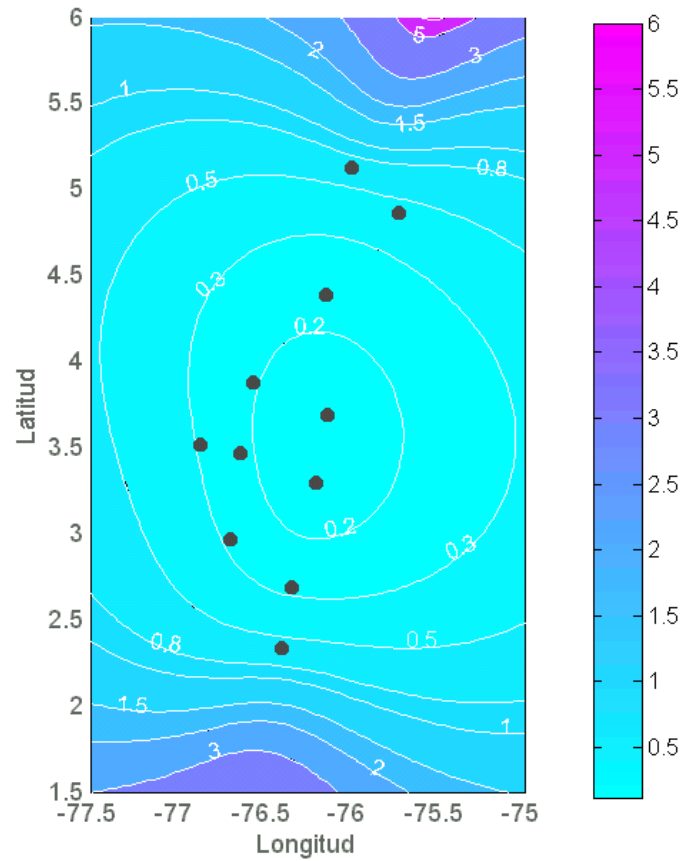


Figura 5.11: Distribución del error en la determinación de latitud-longitud (izquierda) y desviación estándar de este error (derecha) para sismos teóricos ocurridos a 60 km de profundidad.

5.1.8.2. Simulación Monte Carlo para la Red local

A continuación se presentan las gráficas correspondientes a los resultados obtenidos en la simulación realizada con el objetivo de determinar la incertidumbre δ_{xy} , δ_z y δ_t en la estimación de parámetros hipocentrales de 621 sismos teóricos que resultan del error en las lecturas de tiempos de arribo al estimar los parámetros hipocentrales con la configuración actual de la red local. La simulación se realizó para sismos que ocurran a 5 y 10 km de profundidad en el área comprendida entre las longitudes 1.07E y 0.96W y las latitudes 14.496N y 14.586N. Los sismos teóricos son asumidos con llegada de la onda P medida en todas las estaciones con una precisión definida por la desviación estándar de 0.01 segundos.

Aquí se plantea la misma relación que para la Red Regional y se obtiene un valor comparativo para el error en distancia δ_D , este valor fue calculado a partir de $\delta_D = v_p * \sigma_t$ y se obtuvo $\delta_D = 0,065km$.

Sismos teóricos ocurridos a 5 km de Profundidad Las figuras 5.12 y 5.13 son el resultado de la simulación realizada para sismos teóricos ocurridos a una profundidad de 5 km en una región cubierta por la configuración de la red local actual.

La incertidumbre en la determinación del tiempo de origen para sismos localizados con la red local y que ocurren a profundidades de 5 km en el centro de la red (Fig. 5.12, izquierda), cubiertos por todas las estaciones es de 5 veces la desviación estándar del error cometido al identificar los tiempos de arribo en este caso.

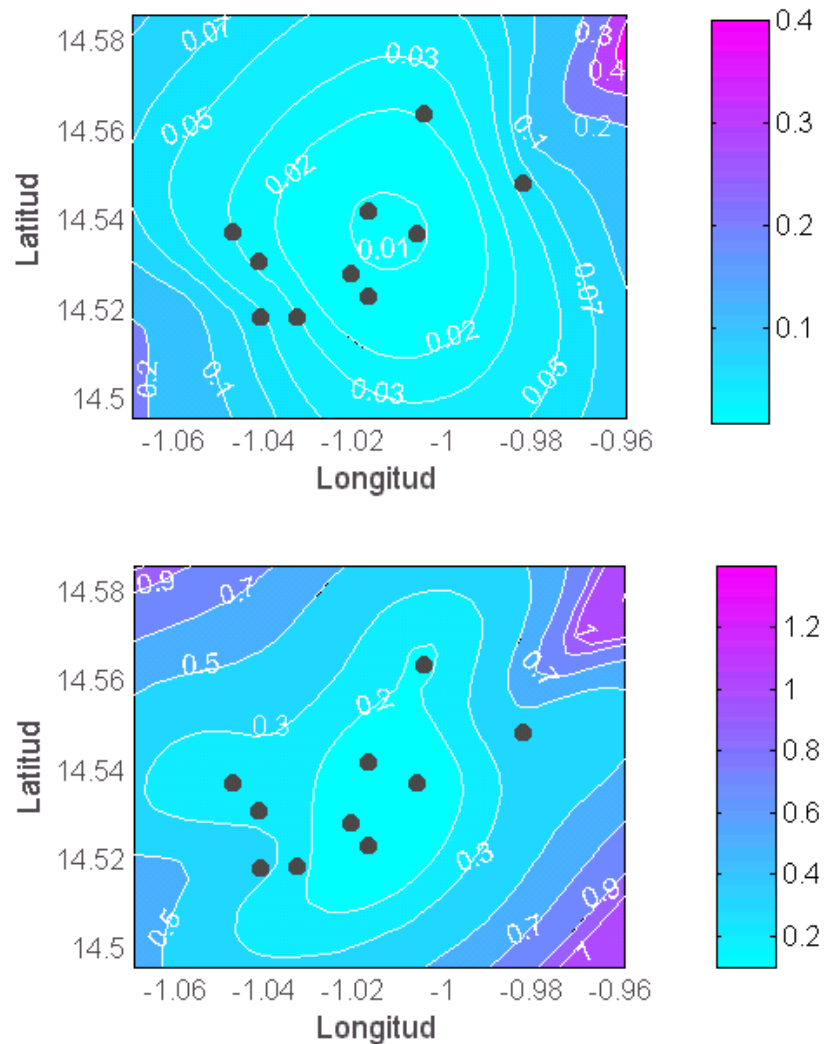


Figura 5.12: Distribución del error en la determinación de tiempo de origen (arriba) y profundidad (abajo), para sismos teóricos a 5 km de profundidad

En cuanto a la incertidumbre en la determinación de la profundidad focal de sismos que

ocurren a 5 km de profundidad (Fig. 5.12, derecha) se observa que está en relación directa con la distribución de estaciones, contrario a lo que ocurre para la incertidumbre en los otros parámetros. El error en la determinación de la profundidad focal para el área cubierta por toda la red es de 0.4 km, lo cual equivale a 6 veces δ_D .

La incertidumbre al determinar las coordenadas epicentrales (Fig. 5.13), se ve mayormente afectada por la configuración de red, presentando una incertidumbre de 0.3 km para el área cubierta por todas las estaciones y de hasta 2.5 km para regiones apartadas de la red y en la misma dirección de la mayor extensión de la red.

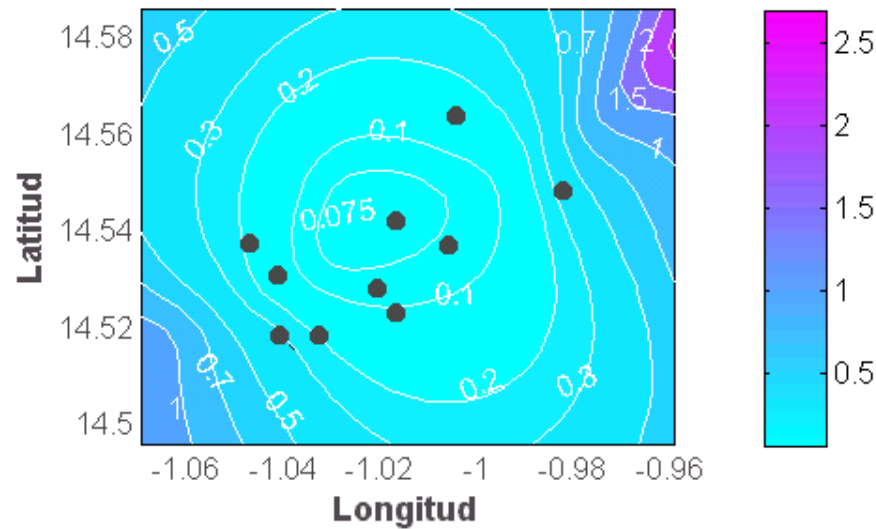


Figura 5.13: Distribución del error en la determinación de latitud-longitud (arriba) y desviación estándar (abajo), para sismos teóricos a 5 km de profundidad.

Sismos teóricos ocurridos a 10 km de Profundidad Los resultados de la simulación llevada a cabo para sismos de profundidad 10 km localizados con la configuración de la red local existente se muestran en las figuras 5.14 y 5.15

La incertidumbre en la determinación del tiempo de origen para sismos que ocurren a 10 km de profundidad (Fig. 5.14, izquierda), presenta el mismo comportamiento que para sismos que ocurren a profundidad de 5 km (Fig. 5.12, izquierda), con una diferencia mínima inferior en este caso sólo denotada por la amplitud de las curvas y por el máximo valor en el extremo superior derecho.

En cuanto a la determinación de la profundidad focal, la incertidumbre en este caso también es inferior que la obtenida para sismos ocurridos a 5 km de profundidad, siendo de 0.3 km para la región cubierta por toda la red, que equivale a 4.6 veces δ_D , y para regiones mas apartadas presenta una diferencia en los dos casos de 0.2 km.

En la determinación de los parámetros hipocentrales se observa el mismo comportamiento para sismos ocurridos a una profundidad de 5 km que para los ocurridos a 10 km.

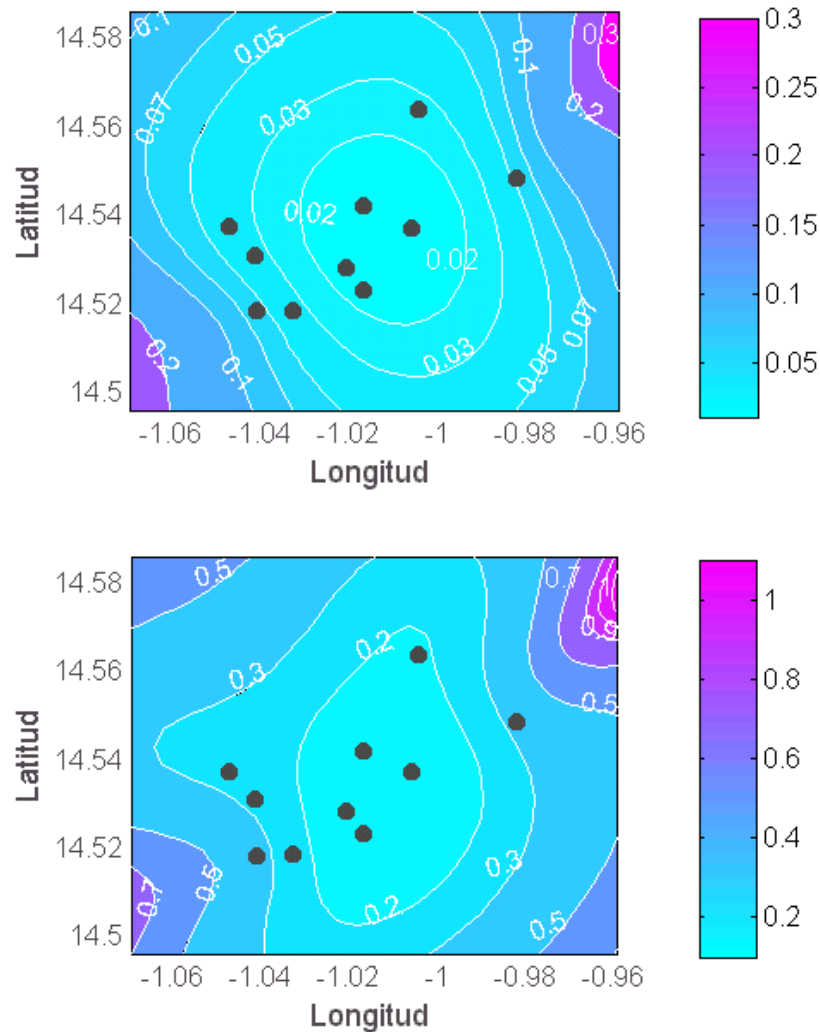


Figura 5.14: Distribución del error en la determinación de tiempo de origen (arriba) y profundidad (abajo), para sismos teóricos ocurridos a 10 km de profundidad.

Para esta red, con base en los resultados obtenidos se destaca,

1. La incertidumbre en la determinación del tiempo de origen, δ_T , en ambos casos es simétrica con respecto al centro de la red, e igual que se encontró en el análisis de resultados para la Red Regional, ésta aumenta en la misma dirección de mayor extensión de la red, proporcionando contornos menores que cubren áreas en sentido opuesto a la dirección de cobertura de la red.

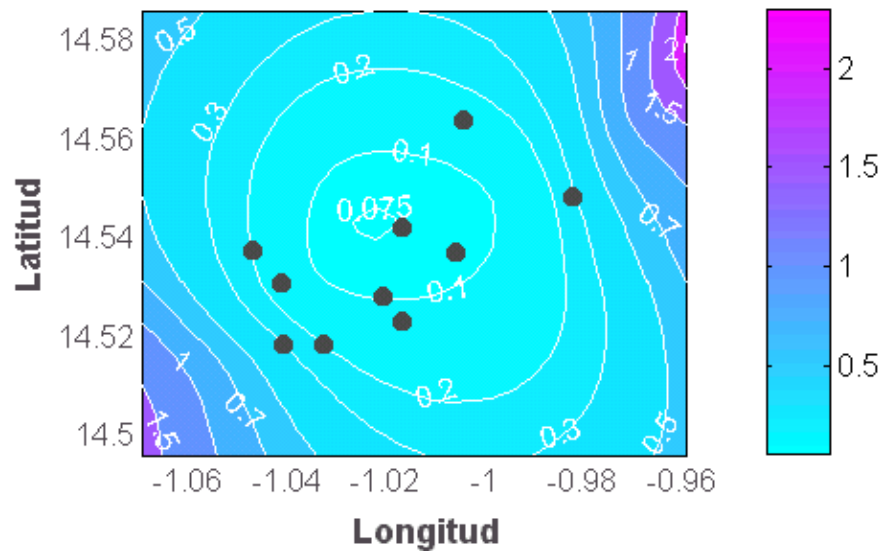


Figura 5.15: Distribución del error en la determinación de latitud-longitud (arriba), y desviación estándar (abajo), para sismos teóricos ocurridos a 10 km de profundidad.

2. La distribución de valores para δ_Z está en relación directa con la orientación o distribución de las estaciones de la red, la distancia entre estaciones y la profundidad focal; obteniéndose con esta red una menor incertidumbre para determinar profundidades focales de 10 km.
3. Para la red local, la distribución de valores de δ_{XY} muestran que la precisión en la determinación de las coordenadas hipocentrales está fuertemente influenciada por la configuración de las estaciones. Puede observarse que la adición de estaciones o de fases leídas en estaciones en una sola dirección no aportan en la determinación precisa de las coordenadas hipocentrales.

5.1.9. Simulación Monte Carlo para la determinación de la mejor ubicación de una nueva estación

Para la determinación del sitio o los sitios en los cuales una nueva estación podría ayudar a mejorar la calidad de las estimaciones se llevó a cabo una simulación Monte Carlo, basándose en el esquema explicado en la sección anterior. Para esta simulación fue necesario tener en cuenta algunos factores que proporcionen una respuesta óptima en el sentido de los objetivos y de las posibilidades de la red, ahorrando tiempo de ejecución de la simulación.

1. Determinación de áreas -dentro del rectángulo definido previamente- que pueden, por diversos factores como disponibilidad y acceso, ser adecuados para la instalación de una nueva estación.

2. Delimitación del área de interés, teniendo en cuenta regiones de mayor actividad sísmica o regiones de mayor interés, a ser monitoreada por la red.
3. Determinación de una distancia mínima entre las estaciones existentes y la posición de la posible nueva estación, con el objetivo de disminuir posibilidades y por ende el tiempo de ejecución.

El objetivo de esta simulación es definir como punto óptimo para una nueva estación, el sitio que proporcione el mayor porcentaje de incertidumbres δ - mínimas.

A continuación se muestran las áreas definidas para cada red y los sitios encontrados como óptimos para la ubicación de una nueva estación.

5.1.9.1. Red local

Con base en los anteriores criterios se definieron dos áreas distintas: una para definir las estaciones, y otra para simular los sismos. Se seleccionó un área en el cual hay posibilidades de instalar estaciones adicionales (Fig. 5.16, región comprendida por el rectángulo azul) y el área de mayor actividad sísmica, la cual en este momento se define como área objetivo para reducir la incertidumbre en la estimación de los parámetros hipocentrales y tiempo de origen (Fig. 5.16, región comprendida por las líneas verdes).

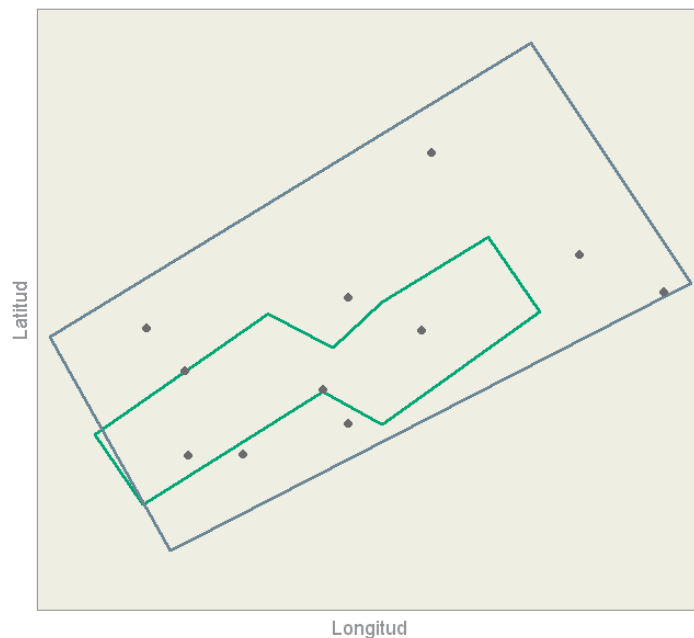


Figura 5.16: Área para selección de sitios para instalación de nuevas estaciones (rectángulo azul) y área de interés para monitoreo de actividad sísmica (líneas rojas)

Los resultados de la simulación llevada a cabo para la determinación de los sitios que proporcionan una mejor estimación (en cuanto a disminución del error) de los parámetros hipocentrales se muestran como porcentajes en la figura 5.17. Los puntos negros corresponden a la ubicación de las estaciones.

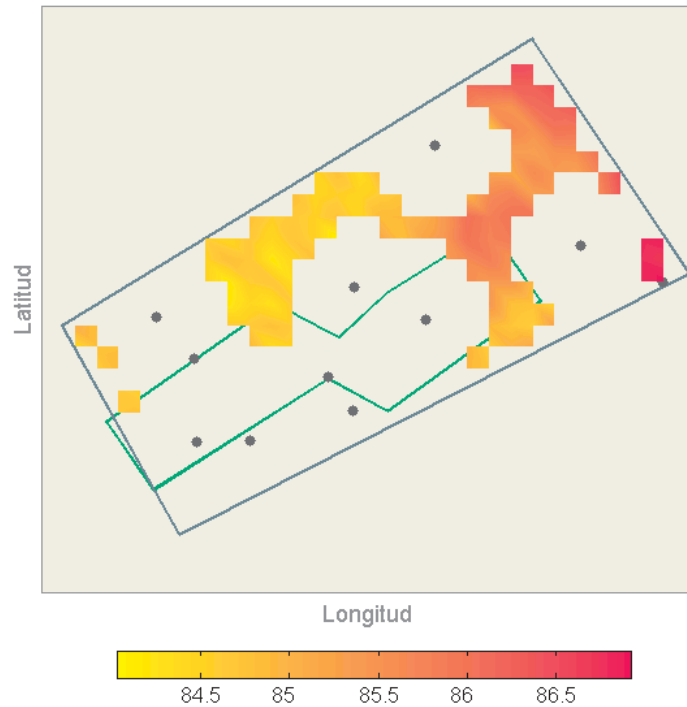


Figura 5.17: Evaluación de sitios para ubicación de nuevas estaciones, red local. Los valores mas altos corresponden a la mejor ubicación.

5.2. Análisis de errores debidos al modelo de velocidades

5.2.1. Remuestreo Jackknife

Teniendo en cuenta el trabajo realizado por Billings et al. (1994b) en el cual el autor propone que los errores debidos al modelo de velocidades se pueden determinar usando diferentes combinaciones de estaciones, y siguiendo el trabajo de Iversen and Lees (1996) quien se concentra en determinar la validación del modelo de velocidades, determinando estadísticos de influencia mediante remuestreo Jackknife, se busca ahora determinar la influencia del modelo de velocidades usado en la determinación de los parámetros hipocentrales de sismos registrados por la red local.

La técnica estadística de remuestreo Jackknife permite estimar pseudo-valores usando diferentes combinaciones de estaciones. Con esta técnica se obtiene una estimación puntual de los parámetros de interés a partir de una muestra de la cual ha sido removido un grupo de datos. En esta aplicación, el procedimiento se lleva a cabo seleccionando un grupo de sismos detectados y localizados por la red local, a los cuales se les remueven observaciones de una estación en cada paso. El objetivo es observar la influencia que ejercen los datos removidos sobre la estimación de los parámetros hipocentrales y el tiempo de origen.

Para llevar a cabo este procedimiento se seleccionó del catálogo de fases de la red local un grupo de sismos con observaciones o lecturas de tiempos de arribo en mas de siete estaciones, para evitar que al eliminar una estación, los resultados puedan ser vistos como debidos a la falta de lecturas mas que a la influencia ejercida por cada estación. Además fue necesario elaborar dos programas: el primero (*extrae.pl*) permite la extracción automática de sismos del catálogo completo, los cuales deben cumplir con la condición del número de estaciones requeridas (en este caso, mínimo 7); al segundo programa (*elimina.pl*) se le entrega una lista de estaciones y la salida obtenida de *extrae.pl*; este programa permite eliminar una a una cada estación del subcatálogo y automáticamente entrega la salida del programa HYPO71 por estación eliminada, la cual contiene las coordenadas hipocentrales y tiempo de origen de cada evento.

Los pasos para la aplicación del remuestreo Jackknife pueden resumirse en:

1. Con el programa *extrae.pl*, se seleccionó del catálogo de la red local un grupo de sismos con lectura de tiempos de arribo (P y S) en por lo menos siete estaciones. Se obtuvo un subcatálogo con 76 sismos.
2. A cada uno de los sismos del subcatálogo se les determinaron los parámetros hipocentrales y tiempo de origen, mediante el programa HYPO71.

$$\hat{\chi} = (\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}, \hat{T}) \quad (5.3)$$

3. Con el programa *elimina.pl*, se procedió a eliminar del subcatálogo la estación LAA. Con las observaciones restantes se determinaron para cada sismo los parámetros hipocentrales y tiempos de origen, de esta manera se obtienen los primeros pseudo valores $\hat{\chi}_{(-LAA)}$ que corresponden a la estimación de los parámetros hipocentrales y tiempo de origen obtenidos al eliminar las observaciones de la estación LAA de cada sismo.

$$\hat{\chi}_{(-LAA)} = (\hat{X}_{(-LAA)}, \hat{Y}_{(-LAA)}, \hat{Z}_{(-LAA)}, \hat{T}_{(-LAA)}) \quad (5.4)$$

4. De la misma manera se procede con las restantes estaciones: del subcatálogo completo se eliminan sucesivamente las estaciones LBB, LCC, ..., y cada vez se guardan las estimaciones obtenidas al eliminar cada una de las estaciones. La diferencia entre cada una de estas estimaciones y las obtenidas con el subcatálogo completo muestran la

influencia de la estación eliminada sobre la determinación de los parámetros, de esta manera se obtiene un estadístico de influencia por estación $\hat{\chi}_{-i}$. Así, el estadístico de influencia para la estación LAA es,

$$\hat{\chi}_{-LAA} = n\hat{\chi} - (n - 1)\hat{\chi}_{(-LAA)} \quad (5.5)$$

5. Con el estadístico de influencia para cada estación se calcula el sesgo de los parámetros. Se calcula el promedio de las 76 estimaciones del estadístico de influencia por estación, y sus respectivas desviaciones estándar. Un sesgo igual a cero, significa que la estimación hipocentral no está influenciada por esa estación en particular Iversen and Lees (1996). Por ejemplo, el sesgo para la estación LAA esta dado por,

$$b_{LAA} = \bar{\chi}_{-LAA} - \hat{\chi}$$

5.2.1.1. Resultados en cuanto a dispersión de los sismos

Las gráficas a continuación muestran la variación espacial en la localización de los 76 sismos obtenidas al eliminar secuencialmente las observaciones de cada estación. Los símbolos azules corresponden a la localización obtenida a partir de observaciones en todas las estaciones; los símbolos rojos corresponden a la relocalización del sismo obtenida al eliminar las observaciones de una estación; los cuadros negros corresponden a la ubicación de las estaciones y el cuadro negro relleno corresponde a la estación que fue eliminada (Figs. 5.18, 5.19 y 5.20).

En las figuras 5.18b y 5.19b, correspondientes a la eliminación de las estaciones LGG y LDD respectivamente, ubicadas muy cerca una de la otra, se observa que no hay cambios significativos en la determinación de los parámetros hipocentrales; esto puede ser atribuido a dos cosas: dada una red de estaciones, si en una pequeña región se encuentren estaciones muy cercanas unas a otras (menos de 4 km), cada una de las cuales proporcionan información de esa región, la eliminación de una de ellas no tiene mayor efecto sobre las estimaciones obtenidas con información de las otras; por otro lado, si se trata de observar heterogeneidades en la estructura de velocidades, es posible que ésta sea la misma para la región correspondiente a las tres estaciones, por tanto al eliminar sólo una de ellas se continua teniendo la influencia o el error proporcionado por las otras estaciones.

En la figura 5.18a se presentan los resultados obtenidos al eliminar la estación LMM -estación más alejada en dirección Norte. Debido a que esta estación proporciona mayor amplitud de la red en sentido N-S, se espera que su ausencia produzca la mayor variación en las estimaciones los parámetros de los sismos que ocurren fuera de la cobertura de la red. Esto coincide con un resultado planteado en la sección anterior, en el sentido que las estaciones que extienden la red en sentido N-S son las que más aportan a la disminución del error en la determinación de los parámetros hipocentrales de los sismos que ocurren mas alejados de las estaciones; mientras que en la figura 5.20b, se observa que al eliminar las observaciones de la estación LCC -estación mas alejada en sentido E-W- la variación en la estimación de los diferentes parámetros es menor.

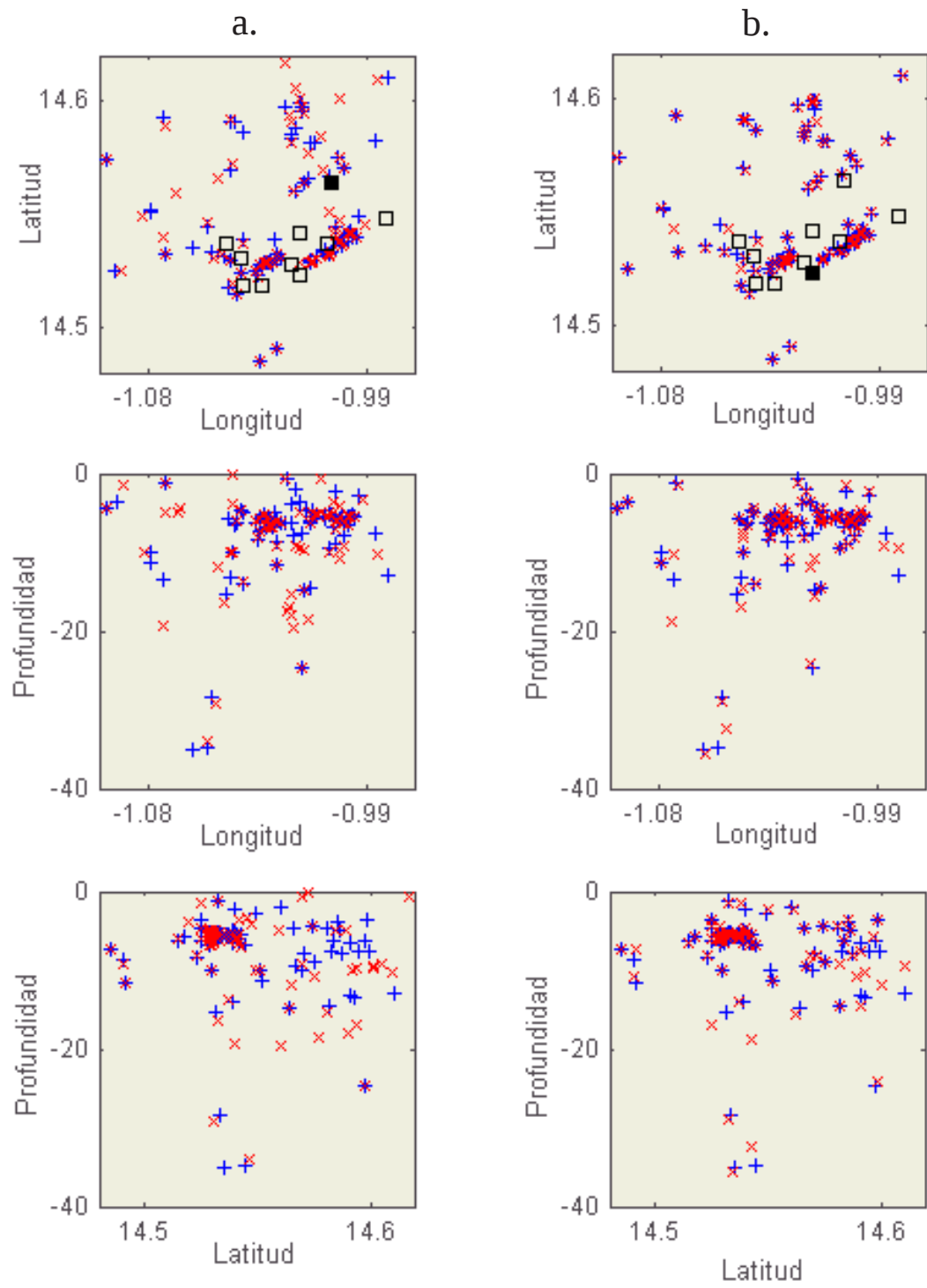


Figura 5.18: Ubicación espacial de los sismos, a. sin observaciones de la estación LMM, b. sin observaciones de la estación LGG

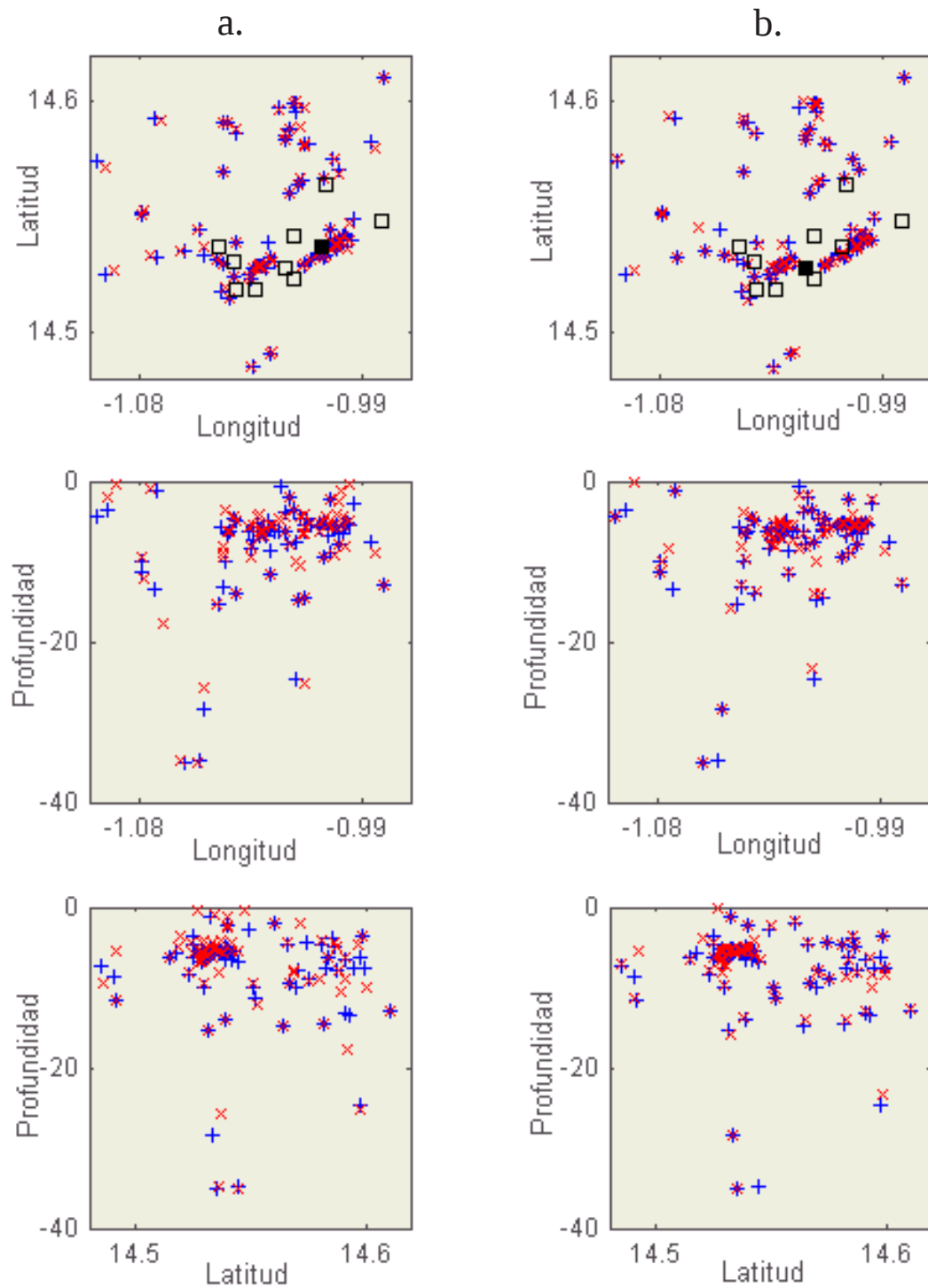


Figura 5.19: Ubicación espacial de los sismos, a. sin observaciones de la estación LBB, b. sin observaciones de la estación LDD

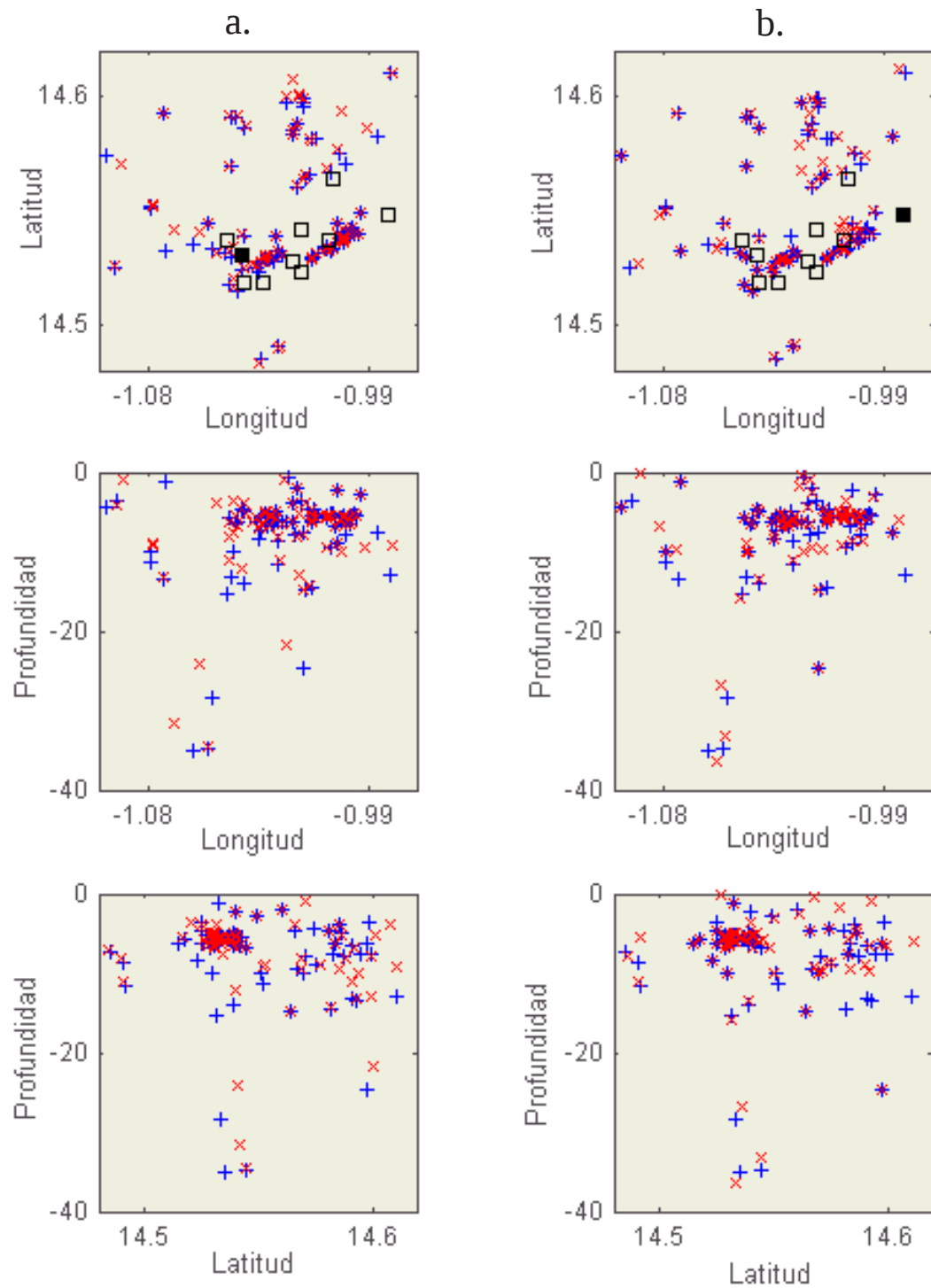


Figura 5.20: Ubicación espacial de los sismos, a. sin observaciones de la estación LFF, b. sin observaciones de la estación LCC

Con los resultados anteriores es muy difícil concluir algo con respecto a lo inapropiado o no del modelo de velocidades especificado y usado para esta región, ya que sobresale la influencia de otros factores como la distribución de las estaciones con respecto a los distribución de los sismos. Por lo tanto, a partir del catálogo completo, se seleccionó un nuevo grupo de sismos con registro en 6 o mas estaciones, que pertenezcan a cúmulos bien definidos, y por lo tanto presenten menor dispersión hipocentral. De acuerdo al procedimiento explicado en la sección anterior (pag. 82), se obtuvo un subcatálogo con 162 sismos.

A continuación se muestra la variación espacial en la localización de estos sismos debidos a la eliminación de observaciones de las diferentes estaciones. Los símbolos azules corresponden a la localización realizada teniendo observaciones de todas las estaciones; los símbolos rojos corresponden a la relocalización del evento sin observaciones de la estación correspondiente, los cuadros negros corresponden a la ubicación de las estaciones, el cuadro negro relleno corresponde a la estación eliminada (Figs. 5.21, 5.22 y 5.23).

La eliminación de las estaciones LBB y LDD (Figs. 5.22 a y b respectivamente), produce la mayor variación espacial de los sismos relocalizados con respecto a las localizaciones obtenidas usando todas las observaciones.

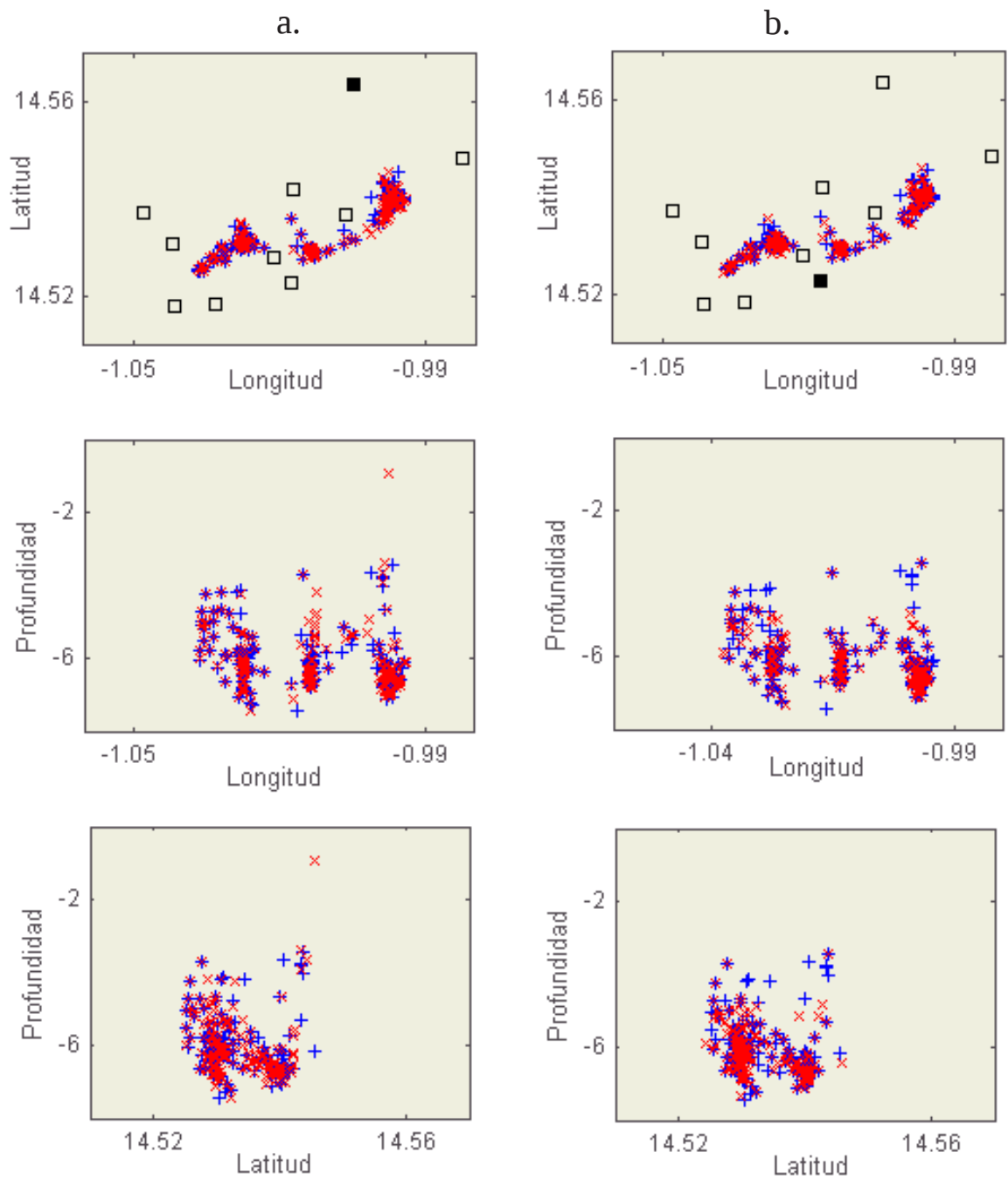


Figura 5.21: Ubicación espacial de los sismos, a. sin observaciones de la estación LMM, b. sin observaciones de la estación LGG

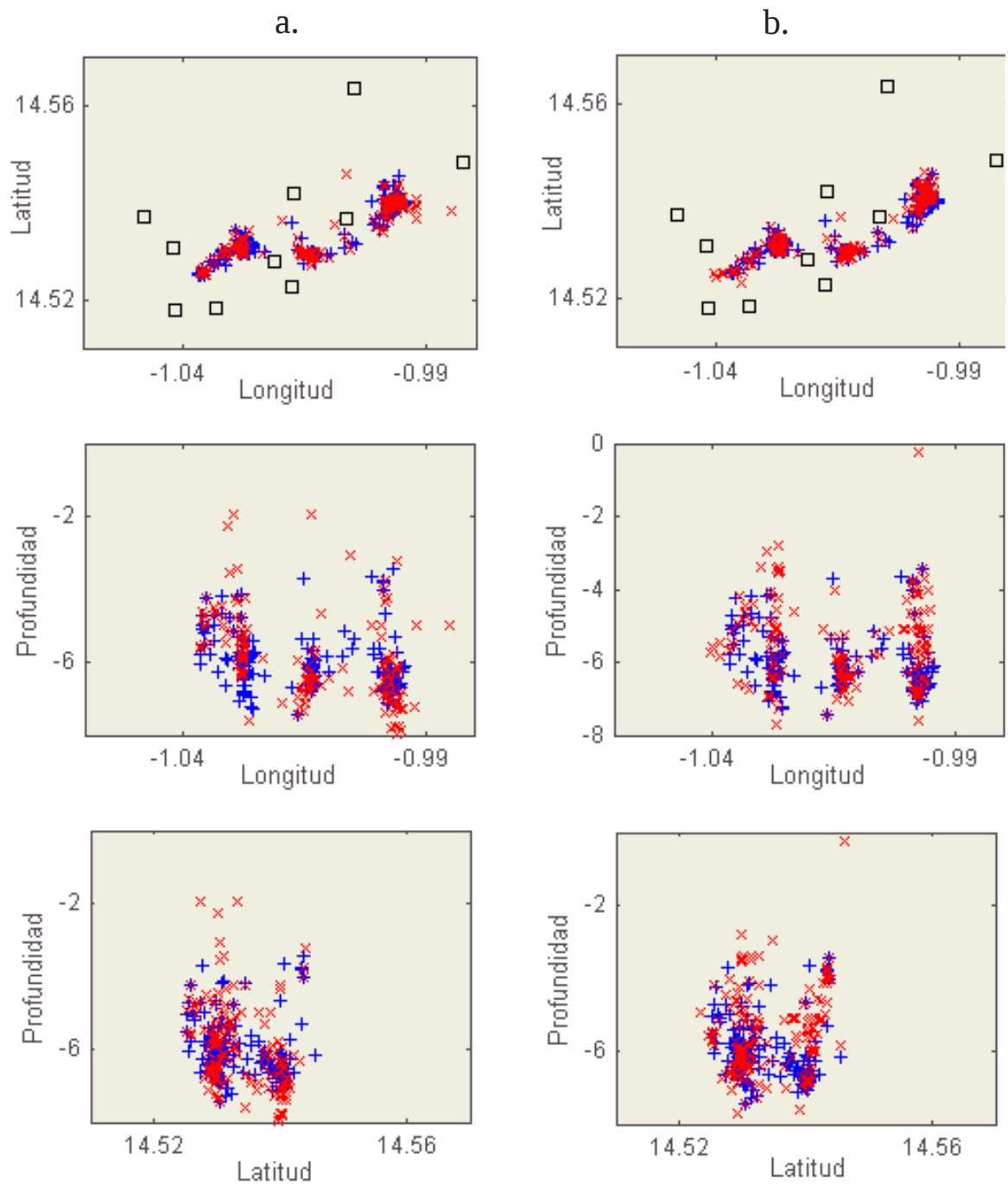


Figura 5.22: Ubicación espacial de los sismos, a. sin observaciones de la estación LBB, b. sin observaciones de la estación LDD

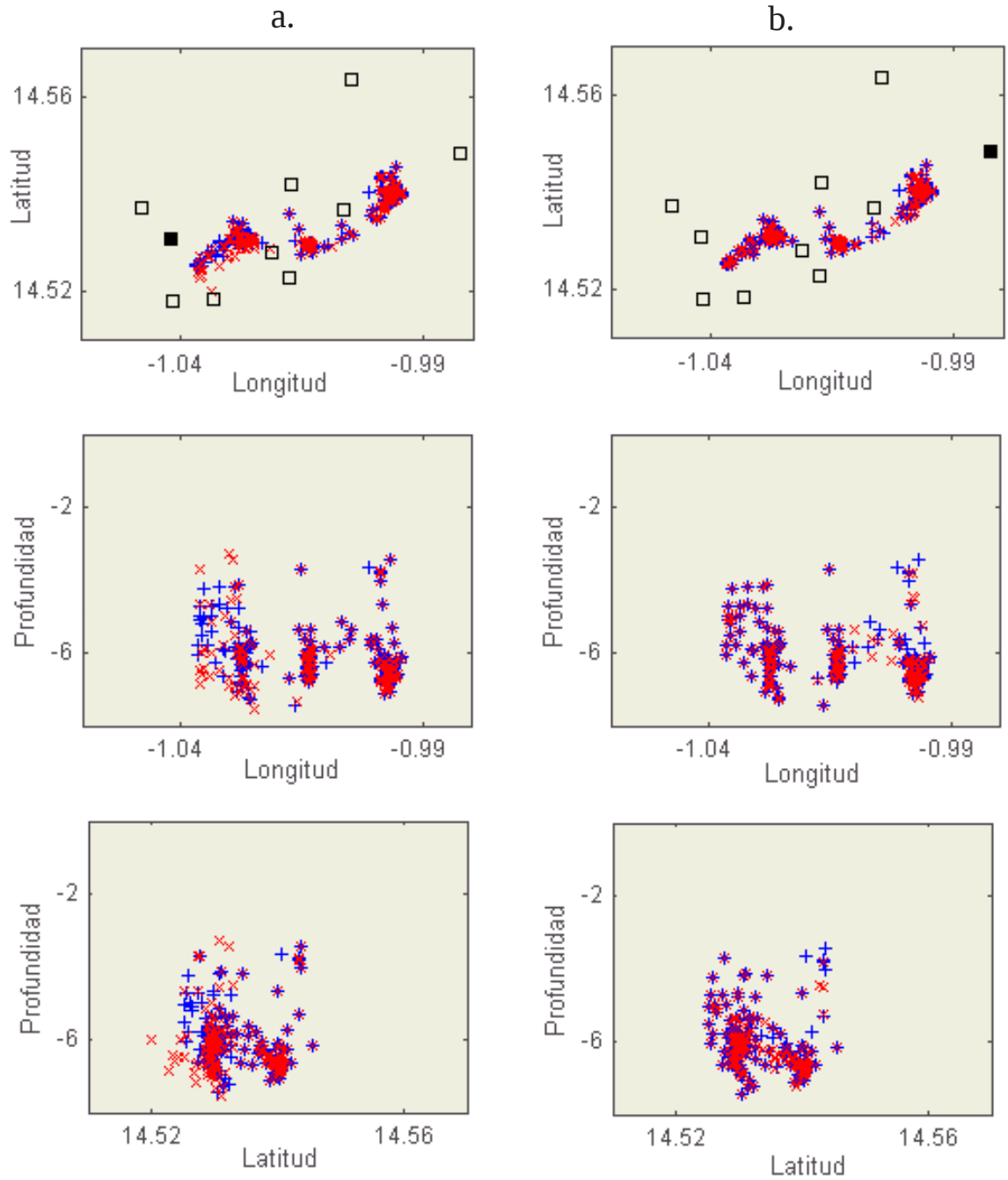


Figura 5.23: Ubicación espacial de los sismos, a. sin observaciones de la estación LFF, b. sin observaciones de la estación LCC

5.2.1.2. *Sesgo por estación en cada uno de los parámetros*

Los resultados de aplicar remuestreo Jackknife con el objetivo de observar la influencia que ejerce cada estación en la estimación de los parámetros hipocentrales, permiten determinar si

la estructura de velocidades asumida para la región correspondiente a la estación es adecuada o no (Iversen and Lees, 1996). El sesgo, es decir la diferencia entre las estimaciones obtenidas usando la muestra completa (observaciones de todas las estaciones) y las estimaciones obtenidas eliminando una estación a la vez, es el indicador de lo adecuado del modelo de velocidades. Este valor fue calculado para el segundo grupo de sismos (162), para cada uno de los sismos y para cada uno de los parámetros (Fig. 5.24).

La figura 5.24 muestra los intervalos de confianza a un nivel de significancia del 99 % para el sesgo promedio obtenido para cada uno de los parámetros a partir de las diferentes muestras. El sesgo promedio por estación corresponde a los puntos azules en cada gráfica y los límites inferior y superior de los intervalos de confianza están denotados por las barras horizontales conectadas por una línea vertical.

Los intervalos de confianza para el parámetro longitud son mostrados en la Figura 5.24a; se observa que 7 estaciones tienen sesgos cuya distribución es significativamente diferente de cero, a excepción de las estaciones LBB, LCC y LJJ. En cuanto al parámetro latitud (Fig. 5.24b), 3 estaciones tienen una distribución del sesgo significativamente diferente de cero, que corresponde a las estaciones LEE, LFF y LKK. Con respecto al parámetro profundidad (Fig. 5.24c), 7 estaciones presentaron sesgos significativamente diferentes de cero.

En conjunto se tiene que las estaciones que presentaron estadísticos de influencia significativamente diferentes de cero en los tres parámetros son las estaciones LFF y LKK. La única estación que no mostró influencia en ninguno de los parámetros es la estación LBB, aunque esta estación mostró también mayor dispersión de los eventos al ser relocalizados sin sus observaciones (Fig. 5.22a). Los dos resultados anteriores pueden ser explicados ya que la estación LBB es una estación importante en la determinación hipocentral de los cúmulos analizados dada su ubicación espacial, que al ser eliminada deja un área bastante grande sin cubrir; la dispersión vista en la distribución espacial (Fig. 5.22a) se refleja en el ancho de los intervalos de confianza obtenidos para el sesgo de los tres parámetros para esta estación (Fig. 5.24); además puede concluirse que el modelo de velocidades actualmente usado describe muy bien la estructura sobre la cual esta estación está ubicada. En general y como se había mencionado anteriormente, si el modelo de velocidades asumido para la región es correcto, el sesgo debe ser estadísticamente cero. Los resultados obtenidos con este método proporcionan evidencia para decir que el modelo de velocidades actualmente utilizado difiere de la estructura real principalmente en el occidente donde se encuentran ubicadas las estaciones LFF y LKK.

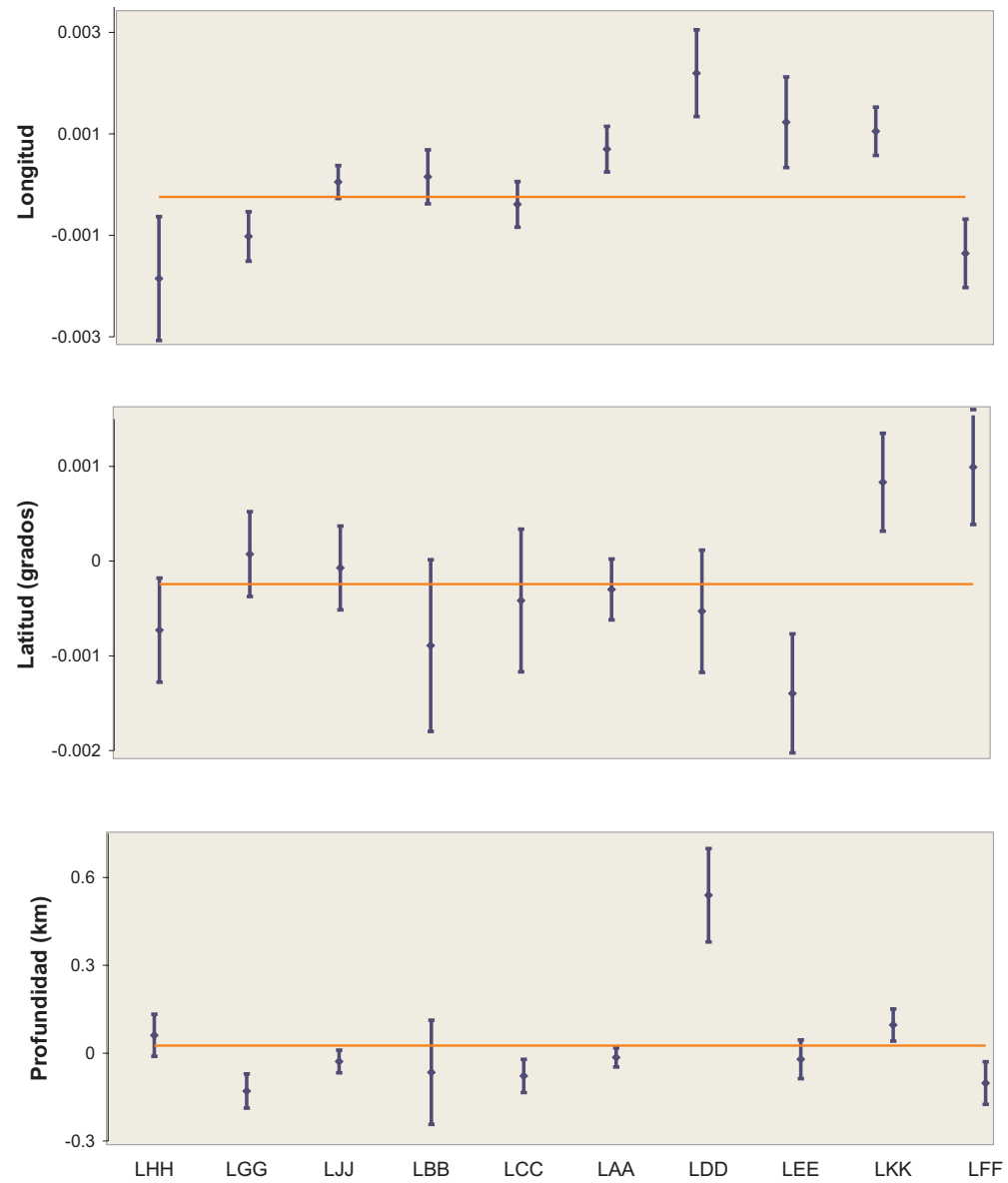


Figura 5.24: Intervalos de confianza para el sesgo por estación y para cada uno de los parámetros hipocentrales