



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Orientación real de sismómetros de
la Red de Banda Ancha del Servicio
Sismológico Nacional por medio del
Análisis de Componentes Principales
y Polarización de Ondas Rayleigh.**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Miguel Ángel Pérez Velázquez

DIRECTOR DE TESIS

Dra. Xyoli Pérez Campos



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice General

Agradecimientos	iv
Resumen	v
Abstract	vi
1 Introducción	7
2 Fundamentos de ondas sísmicas	9
2.1 Ecuación de onda sísmica.	9
2.2 Funciones potenciales del campo de desplazamientos	10
2.3 Onda plana	11
2.4 Polarización de ondas de cuerpo	12
2.5 Ley de Snell	14
2.6 Ondas Rayleigh	16
3 Red de Banda Ancha del SSN	19
3.1 Breve historia del Servicio Sismológico Nacional	19
3.2 La Red de Banda Ancha	20
3.2.1 Selección y preparación de sitio	21
3.2.2 Equipos de alimentación y protección eléctrica	22
3.2.3 Instalación de sensores y equipo sísmico	26
3.3 Giroscopio	31
4 Orientación real de los sismómetros de la RBA	34
4.1 Antecedentes	34
4.2 Estimación por medio de la polarización de ondas Rayleigh	34
4.3 Estimación por medio del análisis de componentes principales	35
4.4 Aplicación de las metodologías a los datos	38
4.5 Estimaciones por época	41
4.6 Orientaciones de las estaciones en la última época	43
4.1 Anomalías de ángulo de arribo y su efecto en la estimación de la orientación con ondas Rayleigh	49
5 Discusión y Conclusiones	54
5.1 Análisis de componentes principales vs polarización de ondas Rayleigh.	54
5.1.1 Comparación de la estimación por medio del análisis componentes principales con la medida del giroscopio	55
5.1.2 Comparación de la estimación por medio de la polarización de ondas Rayleigh con la medida con el giroscopio	56

5.1.3	Comparación entre los métodos de estimación	57
5.2	<i>Caso Tijuana, Baja California</i>	69
5.3	<i>Efectos de una mala orientación en estudios sismológicos</i>	71
5.3.1	Efectos de una mala orientación en funciones de receptor	71
5.3.2	Efectos de una mala orientación en la localización de eventos con una estación	73
5.4	<i>Conclusiones</i>	84
Bibliografía		87
Anexos		90
	<i>Anexo A</i>	90
	<i>Anexo B</i>	93
	<i>Anexo C</i>	103

Dedicatoria

A mi madre Gabriela Velázquez Garduño, por el infinito amor que me ha dado, por ser el mejor ser humano que existe y mi.

A mi viejo Raziel Galván Serrano por enseñarme el verdadero significado de fuerza y perseverancia.

A mi pequeño hermano Yibriam, por tener la paciencia de soportarme y aunque somos tan diferentes hemos caminado juntos todo el tiempo.

A los dos robles de mi familia, mi abuela Ruth y mi abuela Teresita,

A Valeria A. Ocampo, por ser mi motivación e inspiración en este lapso de mi vida.

Agradecimientos

Este trabajo es el resultado conjunto de mi esfuerzo junto con las aportaciones del personal del Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería.

Agradezco al personal de Instrumentación y Mantenimiento de Estaciones Sismológicas del SSN, por la información que aportaron para la construcción del trabajo. En especial al Ing. Antonio de Jesús Mendoza Carvajal, al Ing. Alejandro Hurtado Díaz y al Ing. Fernando Navarro Estrada.

A cada uno del personal de Análisis e Interpretación de Datos Sísmicos por las veces que convivimos en la sala de análisis. Agradezco al Dr. Víctor Hugo Espíndola Castro y al Ing. Daniel González Ávila por las contribuciones especiales en el trabajo.

Por parte del Instituto de Ingeniería, al Dr. Leonardo Ramírez Guzmán, por aportarme bastante en la clase de Sismología de Movimientos Fuertes y por sus observaciones para este trabajo. De manera similar a la Dra. Vala Hjörleifsdóttir por la aportación a este trabajo con su experiencia previa en trabajos similares.

Agradezco enormemente a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, en especial a los siguientes docentes, aquellos que aportaron de manera significativa en mi formación como ingeniero, Ing. Víctor Manuel Campos Durán, Fís. Serigo Roberto Arzamendiz Pérez, Ing. Juan Ocáriz Castelazo, Ing. Félix Nuñez Orozco, Ing. Luis Humberto Soriano Sánchez, Ing. Rolando Peralta Pérez, Dr. Gerardo Suárez Reynoso, Mat. Alberto Ceciliano Hernández, Ing. José Luis Arcos Hernández, Dr. Mauricio Gabriel Orozco del Castillo, Dra. Olga María del Carmen Mucharraz González, Dr. Carlos Ortiz Alemán, M.C. Mauricio Nava Flores, Dr. Martín Cárdenas Soto, Dr. Denis Xavier Francois Legrand, Dra. Claudia Arango Galván, M. C. Héctor Ricardo Castrejón Pineda y Dr. Francisco José Chávez García .

Por último, agradezco a la Dra. Xyoli Pérez Campos por orientarme y apoyarme desde el 2013, año en que cursé la materia de Medio Continuo. Desde ese momento hasta la actualidad ha contribuido de manera excepcional en mi crecimiento profesional. De igual forma agradezco todos los consejos que me ha dado y por todas las veces que me escuchó y por ser tan buen ser humano como lo es como investigadora.

Resumen

Este trabajo surgió con la finalidad de determinar la calidad de la información que se obtiene de las estaciones sismológicas que conforman la Red de Banda Ancha (RBA) del Servicio Sismológico Nacional (SSN). Se estimaron las orientaciones de los sensores de velocidad (sismómetros) que pertenecen a la RBA para distintas épocas instrumentales.

Orientar un sensor triaxial no es una labor fácil, incluso para un ingeniero de campo experimentado. La correcta orientación de los sensores impacta en todos los estudios sismológicos que involucren rotación en las componentes horizontales.

Para realizar las estimaciones, se emplearon dos métodos utilizados para orientar estaciones de fondo oceánico (*Ocean Bottom Seismometer*, OBS). La primera metodología se basa en la polarización de las ondas superficiales tipo Rayleigh. Ésta fue propuesta por Chael (1997) y Selby (2001) y es conocida como Algoritmo CS. La segunda utiliza una técnica lineal ampliamente empleada en distintas ramas de la física, conocida como el Análisis de Componentes Principales (PCA). Este método fue propuesto por Walck y Chael (1991).

Las estimaciones obtenidas en este trabajo con ambos métodos tienen alta correlación con las mediciones realizadas por el personal técnico del SSN con un giroscopio. Al final del trabajo, se muestra el efecto que tiene una mala orientación en dos ejemplos: en la localización de eventos empleando datos de una estación, y en la obtención de funciones de receptor.

Abstract

The purpose of this work is to determine the quality of the information obtained from the seismological stations that constitute the Broadband Network of the Mexican Servicio Sismológico Nacional (National Seismological Service, SSN). We estimate the orientation of the seismometer installed at each site of the Broadband Network for different epochs; each epoch is defined by changes in digitizer or the seismometer. The correct orientation of the sensors is relevant to many seismological studies that involve rotation or require exact information regarding the orientation of the components. However, orienting a triaxial sensor is not an easy task, even for an experienced field engineer. Several factors can affect it during the installation of a seismometer. Between 2015 and 2017, all the seismometers were reoriented using a gyroscope, 62% of them were misoriented by more than 5° ; however, the majority of those were less than 15° . This misorientation corresponds to the last instrumental epoch. To estimate the seismometer orientation during previous periods, we use two methods. The first one is based on the polarization of Rayleigh surface waves (Chael, 1997; Selby, 2001). The second uses a principal component analysis, a linear technique widely used in different branches of physics (Walck and Chael, 1991). The estimations obtained with both methods for the last epoch show high correlation with the measurements with the electronic gyroscope, validating the orientation estimation for the earlier instrumental epochs. Furthermore, we show the effect of sensor misorientation in earthquake location and estimation of receiver functions.

1 Introducción

En la sismología moderna, diversos estudios, tales como la inversión de mecanismos focales, funciones de receptor, análisis de modos normales, de ondas superficiales o cualquier otro estudio que involucre la rotación de ejes coordenados, serán afectados por una mala orientación del sismómetro con respecto al norte verdadero. Por esta razón es fundamental conocer la orientación real de los sensores instalados en las estaciones que conforman la Red de Banda Ancha (RBA) del Servicio Sismológico Nacional (SSN).

Típicamente, un ingeniero de campo determina la orientación del sensor durante la instalación del sismómetro encontrando el norte verdadero, proyectando a una línea de referencia, y midiendo la orientación relativa a la línea de referencia. La forma más común y barata de orientar el sensor es con una brújula magnética. Sin embargo, este método produce un error significativo debido a la influencia de materiales magnéticos cercanos a la estación. El método más preciso para orientar un sismómetro es por medio de un giroscopio, pero el costo y el tamaño del equipo restringe su uso para distintos sitios.

Trabajos como los de Jurkevics (1988), Walck y Chael (1991), Laske y Master (1996), Chael (1997), Selby (2001), Baker y Stevens (2004), Ekström y Busby (2008), Fontain (2009), Niu y Li (2011), Stachnik et al. (2012) y Wang et al. (2016), demuestran que es posible conocer la orientación de los sensores triaxiales utilizando alguna parte del campo de desplazamientos; incluso, Zha y Menke (2013) determinan la orientación de los sismómetros de fondo oceánico (*Ocean Bottom Seismometers*, OBS) utilizando el ruido ambiental de las estaciones.

La diferencia de los trabajos mencionados anteriormente, radica en que parte del campo de ondas es seleccionado para estimar el azimut inverso, siendo Ekström y Busby (2008), los únicos que utilizan el campo de ondas completo para estimar la orientación de los sensores de velocidad.

En este trabajo se busca conocer la orientación real del sismómetro en las estaciones de la RBA por medio del análisis de componentes principales, usando el algoritmo propuesto por Wang (2016); y por medio del análisis de la polarización de ondas Rayleigh, usando el algoritmo de Chael (1997) y Selby (2001), el cual compara la forma de onda de la componente radial con la transformada de Hilbert de la componente vertical.

Para el análisis de componentes principales se trabajó con eventos de magnitud mayor de 5.5, mientras que en el análisis de ondas Rayleigh se usaron eventos con magnitud mayor de 6.0.

Las estimaciones obtenidas en este trabajo se separan por época. Cada época se divide por cambios en el sensor de velocidad y/o en el digitalizador. Las estimaciones muestran una alta correlación con las las mediciones obtenidas con el giroscopio; no obstante, los programas desarrollados para ambos métodos arrojan estimaciones con ambigüedad de 180° para algunos eventos.

En el Capítulo 2 se resumen los fundamentos teóricos de los algoritmos implementados en este trabajo. Se explican las expresiones que describen la polarización de las ondas de cuerpo y las ondas superficiales tipo Rayleigh.

La historia y el funcionamiento de la Red de Banda Ancha (RBA) del Servicio Sismológico Nacional (SSN) se describen en el Capítulo 3. Se resumen las características de los distintos modelos de velocímetros y digitalizadores. Se muestra el procedimiento para instalar una estación de banda ancha. Al final del Capítulo 3, se explica el funcionamiento del giroscopio, instrumento utilizado por el personal de instrumentación del SSN para orientar los velocímetros y acelerómetros de la RBA del SSN.

El Capítulo 4 muestra los algoritmos y las expresiones para estimar el error de orientación en los velocímetros. Se muestran las estimaciones obtenidas para la época con información del giroscopio de fibra óptica.

Los resultados de este trabajo se discuten en el Capítulo 5. También se muestran los efectos de una mala orientación del sensor de velocidad en la obtención de las funciones de receptor y en las localizaciones con una sola estación.

2 Fundamentos de ondas sísmicas

Es necesario explicar algunos conceptos de física de las ondas, con el objetivo de entender los algoritmos utilizados en este trabajo. Este capítulo muestra las expresiones que describen el fenómeno de propagación de una onda sísmica en tres dimensiones, se debe tomar en cuenta que las expresiones mostradas a continuación son derivadas de modelos simples que son una aproximación de una realidad mucho más compleja.

2.1 Ecuación de onda sísmica.

Podemos clasificar de manera muy general las ondas sísmicas en dos tipos, las ondas de cuerpo y las ondas superficiales. De igual forma, podemos clasificar las ondas de cuerpo y superficiales en dos tipos, ondas P y ondas S, y ondas Rayleigh y ondas Love, respectivamente. Se muestra un breve desarrollo de las expresiones que describen la naturaleza de los desplazamientos para las ondas de cuerpo P y S. Para las ondas superficiales, únicamente se aborda el caso de interés, es decir se muestran las expresiones que describen los desplazamientos para las ondas superficiales tipo Rayleigh.

Las ondas de cuerpo se originan de una fuente que puede ser natural, como el caso de un sismo, o artificial, donde interviene el ser humano. Mientras que, las ondas superficiales tienen su origen a partir de la interacción de las ondas de cuerpo bajo condiciones físicas específicas.

Para comprender la naturaleza de los desplazamientos, se parte de la ecuación de onda sísmica (Shearer, 1999),

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \nabla \lambda (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \nabla \mu \cdot [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] + (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} - \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{u}, \quad (2.1)$$

donde \mathbf{u} es el campo de desplazamiento, ρ es la densidad, λ y μ son las constantes o parámetros de Lamé.

Esta forma de la ecuación de onda sísmica se reduce al suponer que el medio es homogéneo; es decir, los parámetros de Lamé son constantes, lo que hace cero los primeros dos términos de la expresión (2.1). La ecuación de onda sísmica para medios homogéneos e isótropos es,

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} - \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{u}. \quad (2.2)$$

Como ya se mencionó al principio del capítulo, esta expresión es una aproximación a la realidad, ya que describe los desplazamientos para un modelo lineal e isótropo de la Tierra.

Para poder resolver la Ecuación (2.2) se separa el campo de desplazamientos en dos partes, aplicando el operador divergencia a la Ecuación (2.2) se obtiene

$$\frac{\partial^2 (\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t^2} = \frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho} \nabla^2 (\nabla \cdot \mathbf{u}), \quad (2.3)$$

donde t es el tiempo. De igual forma, si se aplica el operador rotacional a (2.2), se obtiene

$$\frac{\partial^2(\nabla \times \mathbf{u})}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \nabla^2(\nabla \times \mathbf{u}). \quad (2.4)$$

Las expresiones (2.3) y (2.4) se pueden reescribir en términos de la velocidad de la onda P

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.5)$$

y de la onda S,

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (2.6)$$

Sustituyendo (2.5) y (2.6) en las expresiones (2.3) y (2.4), respectivamente,

$$\frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2(\nabla \cdot \mathbf{u})}{\partial t^2} - \nabla^2(\nabla \cdot \mathbf{u}) = 0 \quad (2.7)$$

y

$$\frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2(\nabla \times \mathbf{u})}{\partial t^2} - \nabla^2(\nabla \times \mathbf{u}) = 0. \quad (2.8)$$

La Ecuación (2.7) es la ecuación de onda asociada a las ondas P, mientras que la (2.8) es la ecuación de onda para las ondas S. Es posible representar la ecuación de onda sísmica en términos de la velocidad de onda P y de onda S, al sustituir (2.5) y (2.6) en (2.2),

$$\ddot{\mathbf{u}} = \alpha^2 \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} - \beta^2 \nabla \times \nabla \times \mathbf{u}. \quad (2.9)$$

2.2 Funciones potenciales del campo de desplazamientos

La forma más común de expresar la contribución de la onda P y de la onda S al desplazamiento es por medio de la descomposición de Helmholtz (e.g., pp. 68-69 Aki y Richards, 1980), que es válida para cualquier campo vectorial,

$$\mathbf{u} = \nabla \phi + \nabla \times \Psi \quad (2.10)$$

o

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_p + \mathbf{u}_s, \quad \mathbf{u}_p = \nabla \phi, \quad \mathbf{u}_s = \nabla \times \Psi, \quad (2.11)$$

donde ϕ es una función potencial escalar y Ψ es una función potencial vectorial.

La Ecuación (2.10) expresa el campo de desplazamientos como la suma del gradiente de un potencial escalar asociado a la onda P y el rotacional de un potencial vectorial

asociado con la onda S. Al sustituir la expresión (2.10) en (2.9), omitiendo el desarrollo obtenemos,

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad (2.12)$$

y

$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0. \quad (2.13)$$

Los desplazamientos asociados con la onda P se obtienen al aplicar el operador gradiente a la solución de la ecuación de onda escalar ϕ . Los desplazamientos asociados con la onda S se obtienen al aplicar el operador rotacional a la solución de la ecuación de onda vectorial Ψ .

2.3 Onda plana

Las expresiones (2.12) y (2.13) describen la propagación en tres dimensiones del campo de desplazamientos. La solución $f(\mathbf{x}, t)$ más simple que satisface las ecuaciones (2.12) y (2.13) tiene la forma de una onda plana armónica, cuya expresión en coordenadas cartesianas es

$$f(\mathbf{x}, t) = \mathbf{A} \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} \pm \omega t), \quad (2.14)$$

donde $\mathbf{A} = (A_x, A_y, A_z)$ es la amplitud de la onda, $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$ es el vector número de onda y siempre es perpendicular al frente de onda, $\mathbf{x} = (x, y, z)$ es el vector de posición, ω es la frecuencia angular, y t es el tiempo. La Figura 2.1 muestra distintos frentes de onda propagándose en dirección del vector \mathbf{k} .

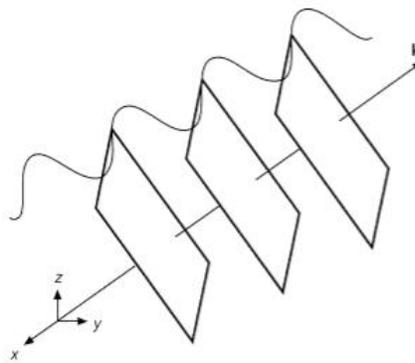


Fig. 2.1 Frentes de onda para una onda armónica viajando en la dirección indicada por el vector número de onda \mathbf{k} . Figura tomada de Stein y Wysession (2003).

La solución como onda plana para los potenciales ϕ y Ψ son

$$\phi = A \exp(i(\mathbf{k}_\alpha \cdot \mathbf{x} \pm \omega t)) \quad (2.15)$$

y

$$\Psi = B \exp(i(\mathbf{k}_\beta \cdot \mathbf{x} \pm \omega t)) \quad (2.16)$$

donde A y $\mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z)$ son la amplitud de la onda P y de la S, respectivamente; \mathbf{k}_α y \mathbf{k}_β son el vector número de onda para la onda P y para la onda S, respectivamente, y tienen la misma dirección \mathbf{k} pero distinta magnitud, $|\mathbf{k}_\alpha| = \omega/\alpha$ y $|\mathbf{k}_\beta| = \omega/\beta$.

Al sustituir las ecuaciones (2.15) y (2.16) en (2.11) obtenemos los desplazamientos para la onda P y para la onda S,

$$\mathbf{u}_P = A i k_\alpha \exp(i(\mathbf{k}_\alpha \cdot \mathbf{x} \pm \omega t)) \quad (2.17)$$

y

$$\mathbf{u}_S = [(B_z k_{\beta y} - B_y k_{\beta z}), (B_x k_{\beta z} - B_z k_{\beta x}), (B_y k_{\beta x} - B_x k_{\beta y})] i \exp(i(\mathbf{k}_\beta \cdot \mathbf{x} \pm \omega t)). \quad (2.18)$$

2.4 Polarización de ondas de cuerpo

Podemos definir el término polarización como la dirección del desplazamiento con respecto a la dirección de propagación de la onda. La contribución al campo de desplazamientos de la onda P está dada por la Ecuación (2.17). La amplitud de las componentes cartesianas de los desplazamientos para la onda P son proporcionales a los cosenos directores de los rayos correspondientes a ondas longitudinales (Udías, 1999); es decir, el movimiento de las partículas es paralelo a la dirección de propagación de la onda.

En contraste, la contribución al campo de desplazamientos de la onda S está dada por la Ecuación (2.18). Los desplazamientos de las ondas S son perpendiculares a la dirección de propagación, esto se demuestra fácilmente al realizar el producto escalar entre \mathbf{u}_S y \mathbf{k}_β , por esto mismo, a las ondas S también se les conoce como ondas transversales. La Figura 2.2 muestra el movimiento de partícula generado por una onda P y una onda S para un tiempo fijo.

Las ondas S tienen dos direcciones de polarización, u_{SV} para las ondas S con componente en un plano vertical que une a la fuente con el receptor y u_{SH} para ondas S polarizadas horizontalmente en un plano perpendicular. Esta separación es útil, ya que u_P y u_{SV} están acoplados cuando la onda interactúa con fronteras horizontales, mientras que la componente u_{SH} permanece separada (Stein y Wysession, 2003). La Figura 2.3 muestra la relación geométrica entre las componentes u_P , u_{SV} y u_{SH} .

Hoy en día es muy común registrar los desplazamientos de una onda sísmica en sismómetros de tres componentes ortogonales (x, y, z). Los desplazamientos horizontales

se registran en un plano ($x - y$), con x positivo y paralelo al Norte geográfico (Norte-Sur), y y positivo y paralelo al Este (Oeste-Este) y z completamente vertical y positivo hacia abajo.

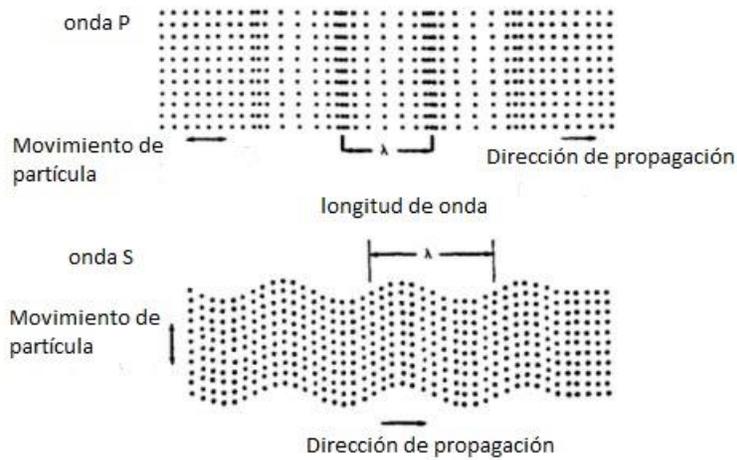


Fig. 2.2 Desplazamientos producidos por onda P (arriba) y onda S (abajo) para un tiempo fijo. Figura modificada de Lay y Wallace (1995)

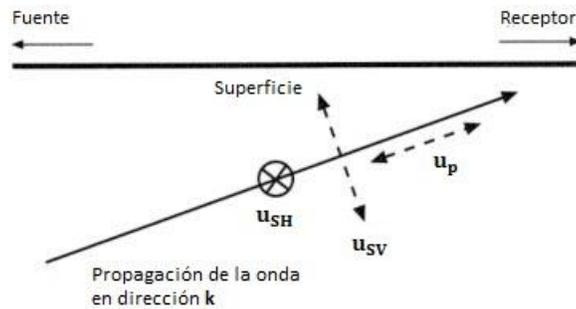


Fig. 2.3 Campo de desplazamientos para onda plana P y onda plana S propagándose en un plano que contiene a la fuente y al receptor. La onda P está polarizada en dirección del vector k . La onda S se descompone en dos polarizaciones u_{SH} y u_{SV} , perpendiculares al vector k . Los desplazamientos de la componente u_{SH} son completamente horizontales, mientras que los desplazamientos de la componente u_{SV} se encuentran contenidos en el plano vertical que une la fuente con el receptor (Modificada de Stein y Wysession, 2003).

Es poco frecuente que la polarización u_{SH} y u_{SV} coincidan con los registros de las componentes horizontales Norte-Sur y Oeste-Este; no obstante, las componentes horizontales se rotan. Se define un nuevo sistema de referencia con componentes "radial" u_R y "transversal" u_T (Figura 2.4). Las ecuaciones (2.19) y (2.20) describen la

transformación lineal del sistema de referencia Norte-Sur / Oeste-Este al sistema Radial/Transversal.

$$\begin{pmatrix} u_R \\ u_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{OE} \\ u_{NS} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

o

$$\begin{pmatrix} u_R \\ u_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \text{sen}\varphi \\ -\text{sen}\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{NS} \\ u_{OE} \end{pmatrix}, \quad (2.20)$$

donde, u_{NS} y u_{OE} son los desplazamientos registrados en las componentes Norte-Sur y Oeste-Este, respectivamente, φ es el azimut inverso y se define como el ángulo medido desde el Norte que conecta el receptor con la fuente y $\theta = \frac{3\pi}{2} - \varphi$.

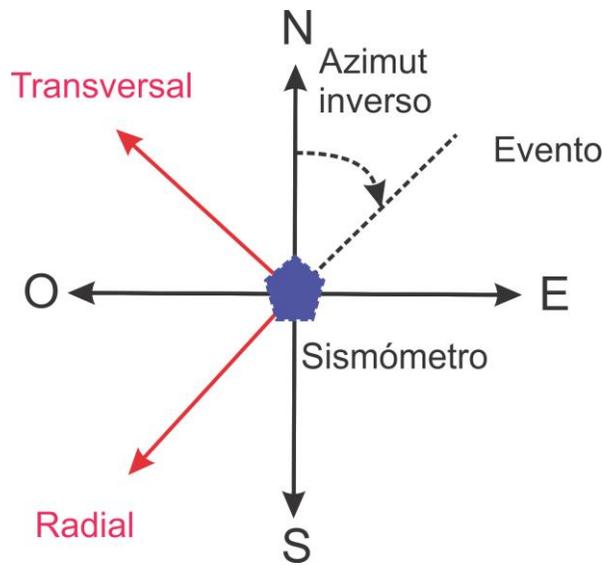


Fig. 2.4 Sistema de referencia Radial / Transversal.

2.5 Ley de Snell

La dirección de propagación se puede expresar con el ángulo que hay entre la vertical y el vector número de onda \mathbf{k} , a este ángulo se le conoce como ángulo de incidencia (Fig. 2.5). Se ha analizado la propagación de la onda sísmica en tres dimensiones para el caso de una velocidad constante; sin embargo, el modelo más común para representar la propagación de una onda sísmica en la Tierra, es mediante un modelo que supone variaciones verticales en la velocidad.

El cambio en el ángulo de incidencia, i para ondas P y j para ondas S, se obtiene con la ley de Snell,

$$p = \frac{1}{c_x} = \frac{\text{sen } i_1}{\alpha_1} = \frac{\text{sen } j_1}{\beta_1} = \frac{\text{sen } i_2}{\alpha_2} = \frac{\text{sen } j_2}{\beta_2}, \quad (2.21)$$

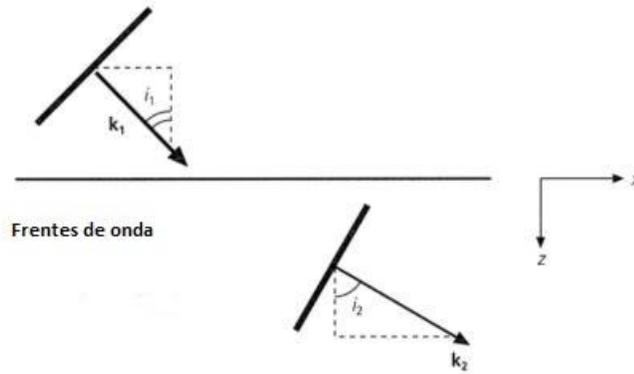


Fig. 2.5 Cambio de dirección de una onda plana cuando ingresa a un medio con una velocidad distinta. Figura tomada de Stein y Wysession (2003).

donde p es la lentitud horizontal, c_x , la velocidad aparente horizontal, α_1 y β_1 , la velocidad de la onda P y de la onda S, respectivamente, para el medio 1, α_2 y β_2 , la velocidad de la onda P y la onda S, respectivamente, para el medio 2.

Se define al ángulo crítico i_c , como el ángulo mínimo de incidencia en el cual se produce una reflexión total. Matemáticamente el ángulo crítico se define como

$$\text{sen } i_c \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right) = 1, \tag{2.22}$$

Cuando el ángulo de incidencia excede el valor del ángulo crítico, el desplazamiento en el segundo medio no es una onda plana, sino que da origen a una onda "evanescente" que se propaga en la interfase de los dos medios, decayendo su amplitud al alejarse de la interfase.

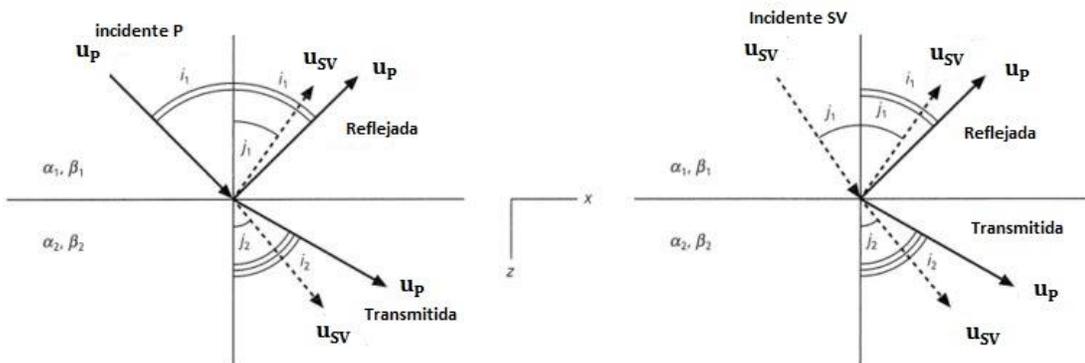


Fig. 2.6 Ley de Snell para una onda plana propagándose a un medio con mayor velocidad. Izquierda: la onda P incidente transmite y refleja una onda P y una S con polarización SV. Derecha: en este caso la onda que incide es la onda S con polarización SV. Figura modificada de Stein y Wysession (2003).

2.6 Ondas Rayleigh

Al principio del capítulo se clasificaron las ondas sísmicas en dos tipos, ondas de cuerpo y ondas de superficie. Las expresiones (2.16) y (2.17) describen los desplazamientos para los dos tipos de ondas de cuerpo, suponiendo un modelo simple de un medio homogéneo. Las expresiones que describen los desplazamientos para las ondas superficiales tipo Rayleigh se pueden deducir suponiendo un modelo simple de un semi-espacio homogéneo bajo condiciones de frontera de superficie libre (Stein y Wysession, 2003).

La deducción de las expresiones (2.21) y (2.22), se puede consultar en distintos libros de sismología, como los de Lay y Wallace (1995), Udías (1999), Stein y Wysession (2003), Shearer (2009), etc. El propósito del capítulo es conocer las expresiones que describen la naturaleza de los desplazamientos para las ondas de cuerpo (P y S) y las ondas de superficie (Rayleigh) y, no la deducción de las mismas; sin embargo, se describirán brevemente las condiciones físicas que dan origen a las ondas tipo Rayleigh.

Las ondas Rayleigh involucran la interacción de las ondas P y de las ondas S en una superficie libre, específicamente la interacción $u_{SV} - u_P$. La Figura 2.7 muestra la interacción entre las componentes u_P y u_{SV} para condiciones de frontera de una superficie libre; además, este sistema debe dar origen a una onda "evanescente"; esto quiere decir que el ángulo de incidencia debe ser mayor que el ángulo crítico (ángulo post-crítico). La existencia simultánea de la energía de la onda evanescente P y SV, viajando horizontalmente a lo largo de la superficie libre, produce ondas de superficie tipo Rayleigh (Lay y Wallace, 1995). La Figura 2.8 muestra las condiciones para que se genere una onda Rayleigh.

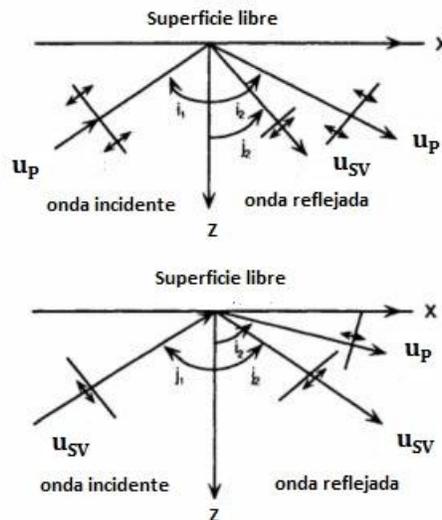


Fig. 2.7 Geometría de las interacciones de superficie libre con una onda incidente P y una onda incidente S con polarización SV (Modificada de Lay y Wallace, 1995).

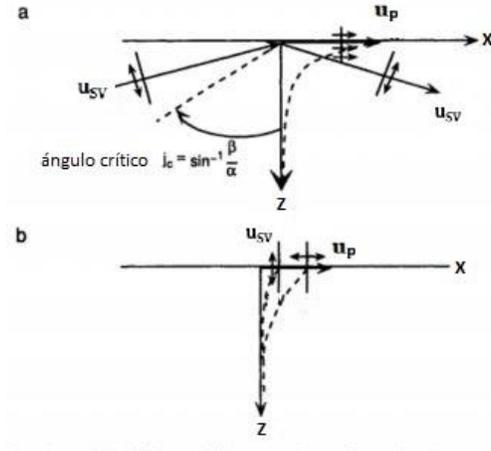


Fig. 2.8 a) Incidencia post-crítica sobre una superficie libre de una onda con polarización SV da origen a una onda evanescente y una onda con la misma polarización, pero reflejada. b) Origen de las ondas Rayleigh bajo la existencia simultánea de la energía de una onda evanescente P y SV. Figura modificada de Lay y Wallace (1995).

Las ondas Rayleigh se propagan en un plano vertical que une la fuente con el receptor; teóricamente, sólo aparecen en las componentes radial y vertical.

Las expresiones que describen los desplazamientos ocasionados por la existencia de ondas Rayleigh en un medio homogéneo considerando un sólido de Poisson, $\alpha = \sqrt{3}\beta$ son

$$u_r(x, z, t) = -Ak_x \sin(\omega t - k_x x) [\exp(-0.85k_x z) - 0.58 \exp(-0.39k_x z)], \quad (2.21)$$

y

$$u_z(x, z, t) = -Ak_x \cos(\omega t - k_x x) [-0.85 \exp(-0.85k_x z) + 1.47 \exp(-0.39k_x z)]. \quad (2.22)$$

Al variar el tiempo, los desplazamientos en la componente radial y la componente vertical se combinan para describir un movimiento elíptico retrogrado, debido a que la componente vertical y la componente radial están fuera de fase en 90° . El movimiento elíptico retrogrado cambia a un movimiento prógrado cuando se alcanza aproximadamente una quinta parte de la longitud de onda. La Figura 2.9 muestra la polarización elíptica de las ondas Rayleigh y la fase que existe entre la componente radial y vertical.

La relación de fase entre las componentes de desplazamiento radial y vertical de una onda Rayleigh es el fundamento básico para estimar el azimut-inverso utilizando el método de polarización de ondas Rayleigh (algoritmo CS).

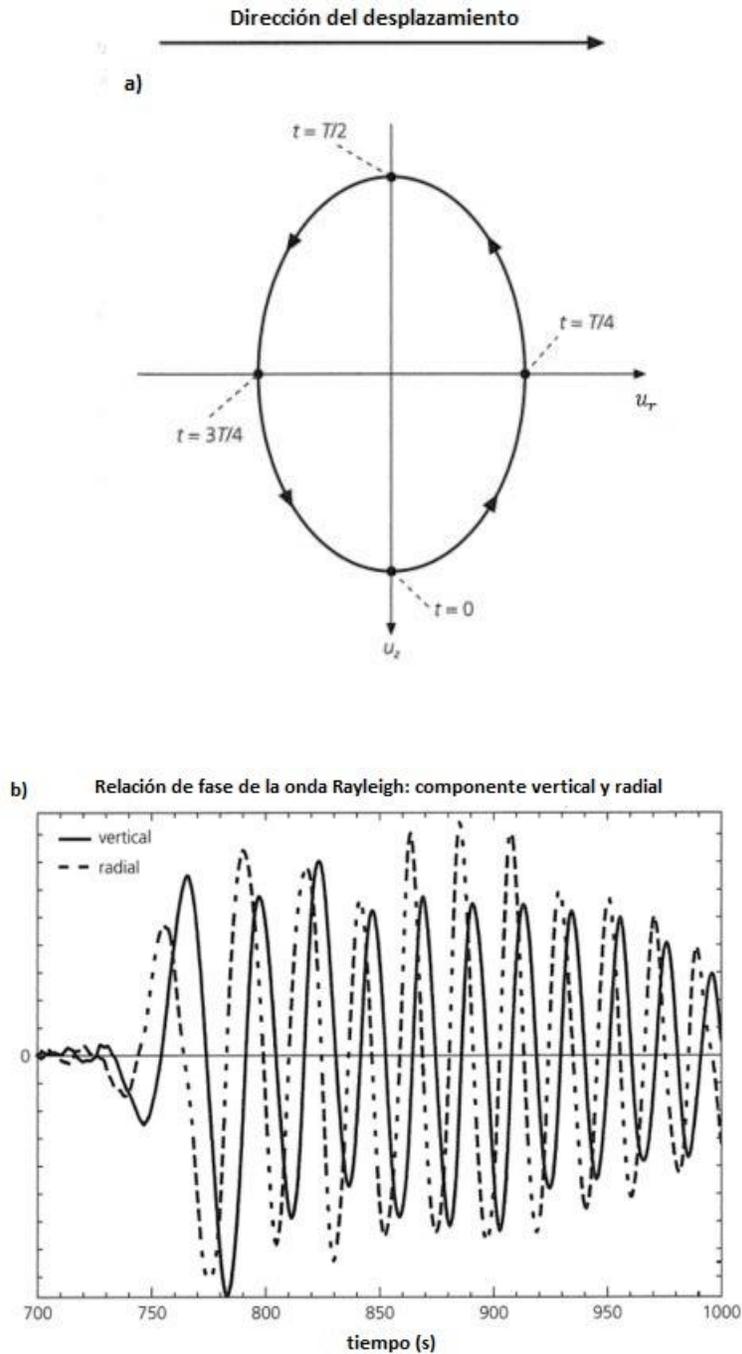


Fig. 2.9 a) Elipse descrita por las componentes fuera de fase de una onda Rayleigh. b) Relación de fase para la onda Rayleigh entre la componente radial y la componente vertical. Figura modificada de Stein y Wysession (2003).

3 Red de Banda Ancha del SSN

3.1 Breve historia del Servicio Sismológico Nacional

La información presentada en esta sección del capítulo fue resumida de la página del Servicio Sismológico Nacional (SSN), recuperado de <http://www.ssn.unam.mx/acerca-de/historia/>. El SSN se fundó en 1910, por el entonces presidente de México Porfirio Díaz, con motivo del centenario de la Independencia de México, teniendo como objetivo principal el integrar a México a la Asociación Sismológica Internacional.

Desde su fundación hasta 1929, el SSN quedó a cargo del Instituto Geológico Nacional. Durante este periodo se instalaron nueve estaciones sismológicas autónomas. La estación central se instaló en Tacubaya, Ciudad de México. Las estaciones restantes se ubicaron en las ciudades de Oaxaca, Mazatlán, Mérida, Chihuahua, Guadalajara, Veracruz, Zacatecas y Monterrey. Todas utilizaban sismómetros alemanes marca "Weichert".

A partir de 1929, el SSN forma parte de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Después de 19 años, en 1948 quedó adscrito al Instituto de Geofísica (IGEF).

En los años 70, con el fin de tener estaciones telemétricas digitales en todo el país, comenzó la instalación de la Red Sísmica de Apertura Continental (RESMARC) a cargo de la UNAM. Es hasta agosto de 1986 que la red RESMARC se integra al SSN, mejorando la cobertura en el país, permitiendo por primera vez contar con registros en tiempo real; no obstante, la densidad de estaciones no era suficiente para el tamaño del territorio mexicano.

Durante el inicio de los 90's, el Departamento de Instrumentación del Instituto de Geofísica comenzó a instrumentar las estaciones telemétricas digitales y también desarrolló sistemas de adquisición y procesamiento automático de datos sísmicos.

Es en 1992, cuando se inicia la modernización de la Red Sísmica Mexicana, gracias al apoyo de Secretaría de Gobernación (SEGOB) y la UNAM, con esta acción nace la Red de Observatorios Sismológicos de Banda Ancha.

Actualmente, el SSN tiene disponible información de redes propias y externas. Las redes propias del SSN son:

- Red Sísmica del Valle de México (32 estaciones).
- Red del Volcán Tacaná (3 estaciones).
- Red de Banda Ancha del SSN (63 estaciones).

Las redes externas al SSN son:

- Red de acelerómetros del Instituto de Ingeniería (23 estaciones).
- Red de la Universidad de Colima (8 estaciones).
- Red Universidad Veracruzana (6 estaciones).

- Red de CICESE (8 estaciones).
- Red de Jalisco (7 estaciones).
- CTBTO (3 estaciones).
- USGS (1 estaciones).

La Figura 3.1 muestra la distribución geográfica de las estaciones propias y externas del SSN.

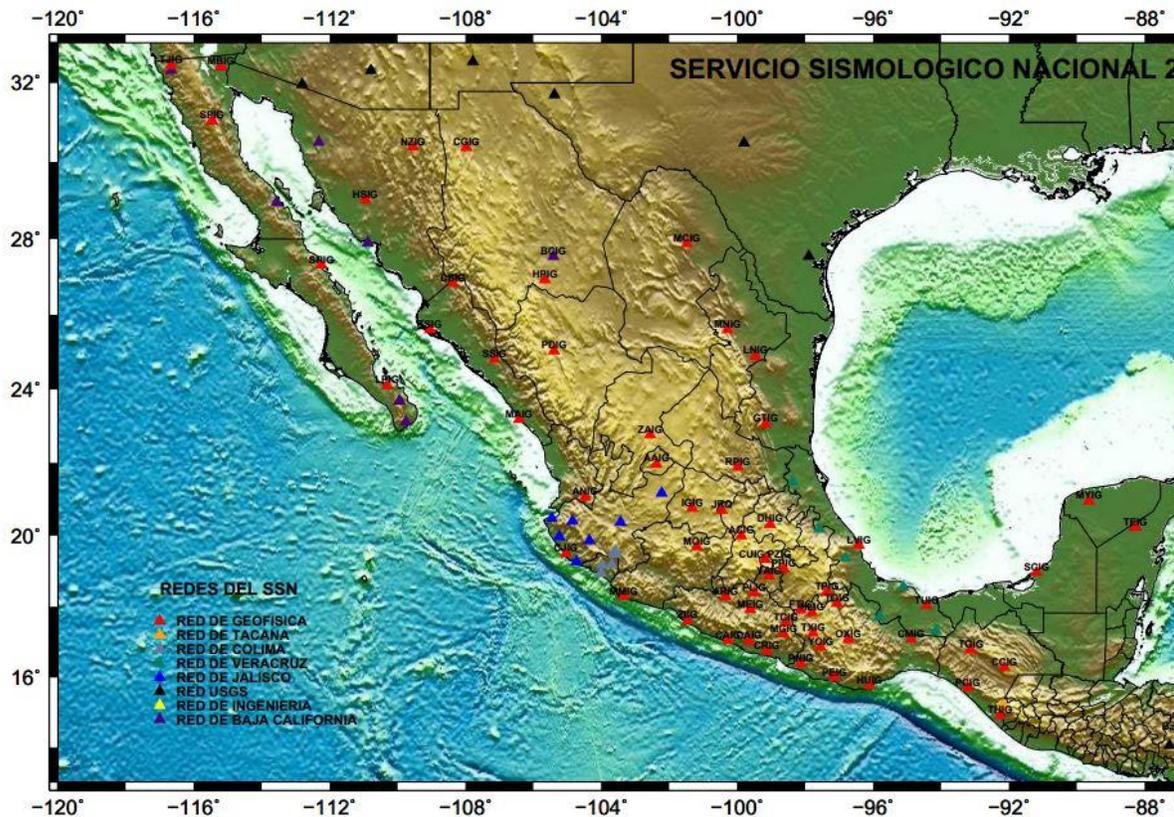


Fig. 3.1 Distribución de las redes que envían datos al SSN.

3.2 La Red de Banda Ancha

Una red sismológica es un conjunto de estaciones u observatorios sismológicos, diseñada para monitorear algún tipo de actividad sísmica en particular. La Red de Banda Ancha (RBA) está constituida por 63 estaciones sismológicas y su sede se encuentra en Ciudad Universitaria (C.U.), Ciudad de México. Los datos que se reciben incluyen información de aceleración, velocidad y desplazamiento. Las estaciones están distribuidas principalmente en las regiones de mayor potencial sísmico.

Una estación sismológica de la RBA cuenta con los siguientes instrumentos:

- Digitalizador
- Velocímetro
- Acelerómetro
- Antena y receptor GPS
- Sistema de transmisión
- Sistemas de alimentación ininterrumpida (*Uninterruptible Power Supply*, UPS).

A continuación se detalla sobre la selección de sitio, la instalación y los instrumentos de una estación de banda ancha del SSN (Navarro, 2015).

3.2.1 Selección y preparación de sitio

La selección de sitio para una estación de banda ancha es importante para poder obtener información de calidad. La calidad de la información depende directamente de los niveles de ruido sísmico. Sin importar la tecnología de los sensores, siempre está presente la relación entre el nivel de calidad de la señal sísmica con los niveles de ruido en sitio. También, se debe considerar el tipo de suelo, ya que los sensores de banda ancha responden distinto en diferentes tipos de suelo. Lo más recomendable es elegir un afloramiento de roca.

Para definir una región de interés, se debe determinar qué tipo de información se pretende obtener. En el caso específico del SSN, la región de interés será para cumplir con los objetivos de la institución. A continuación se enlistan los objetivos del SSN, tomado directamente de la página del SSN (<http://www.ssn.unam.mx/acerca-de/mision/>):

1. *Establecer y mantener una red de monitoreo de sismos en el país, que opere con altos estándares de calidad y de manera continua. Mantener un monitoreo continuo de los fenómenos sísmicos que tienen lugar en el país, usando instrumentos de aceleración, velocidad y desplazamiento.*
2. *Distribuir la información de manera oportuna y eficiente de la localización y magnitud de un sismo. También, cuando sea el caso y la cobertura de la red lo permita, proporcionar a las instancias correspondientes los parámetros necesarios para emitir alertas tempranas o iniciar protocolos de protección civil.*
3. *Archivar y distribuir de manera eficiente a la comunidad científica mundial, toda la información y datos generados. Establecer y mantener un programa de difusión y divulgación de la sismología.*

Una vez definidos los objetivos, se procede a delimitar la región de interés. Una de las herramientas más útiles para delimitar la región de interés son las cartas geológicas. Se busca delimitar el área donde se encuentre suelo firme, se descartan áreas con suelo muy blando.

A continuación se muestran algunas consideraciones ideales para instalar una estación de banda ancha:

1. Se evita instalar estaciones cercanas a fuentes de ruido sísmico como ferrocarriles y ríos. Los sitios ideales son aquellos con un nivel de ruido sísmico muy bajo.
2. Se debe considerar la distancia que se tiene a la fuente de energía eléctrica, al

- aumentar la distancia aumenta el costo y la cantidad de problemas a futuro.
3. Se debe considerar la distancia que hay a las vías de comunicación, ya que influye en el costo de la construcción y mantenimiento.
 4. Se deben considerar otros aspectos, como lo son la inclinación del terreno, fuentes de agua que dañarían a futuro la estación y el vandalismo en la zona.

Una vez seleccionado el sitio se realizan mediciones de ruido sísmico. Se define como ruido sísmico a todos los movimientos que afectan la calidad de la señal sísmica y se originan por causas naturales o por el hombre. Los niveles de ruido en un sitio se obtienen dejando un sensor de velocidad en condiciones controladas, registrando un tiempo determinado para poder realizar un análisis de la información.

Una vez que se seleccionó el sitio se procede a prepararlo. La estructura de la caseta sismológica de banda ancha tiene características especiales para contrarrestar las diferentes variables ambientales y de logística, para garantizar la operación continua de los instrumentos. Para contrarrestar variables ambientales, algunas estaciones tienen doble muro para disminuir los cambios de temperatura en el interior, también se sugiere poner impermeabilizante blanco, ya que el color blanco ayuda a controlar la temperatura en el interior.

La caseta está dividida en dos cuartos. Uno contiene el digitalizador, los instrumentos de comunicación y las fuentes alimentación y protección eléctrica, el segundo contiene los sensores de velocidad y aceleración, en este cuarto los instrumentos están aislados de los cambios de temperatura que afectan las características de los sensores. La Figura 3.4 muestra otros aspectos importantes en la instalación de la caseta, como el material de los muros, el pilar de los instrumentos sísmicos y la malla ciclónica. La Figura 3.5 muestra el proceso de construcción de la tierra física. Ésta es de suma importancia, pues se encarga de proteger a los equipos instalados contra todas las descargas originadas por la atmósfera.

3.2.2 Equipos de alimentación y protección eléctrica

Se utiliza un regulador ferorresonante para proteger los equipos conectados de los altos voltajes procedentes de la línea comercial eléctrica. Es importante proteger los equipos conectados, debido a que no debe entregar mayor voltaje que el especificado.

Se utilizan este tipo de reguladores, ya que es un equipo muy resistente al traslado y sobretodo proporciona alto rechazo al ruido y a los picos que provienen de la línea de tensión.

La capacidad del regulador oscila entre 1 kVA y 3 kVA. Algunas estaciones más pequeñas pueden funcionar óptimamente con 1 kVA.

El cálculo de la capacidad del regulador es importante ya que, si se llega a subestimar la demanda energética de la estación sobre el regulador, éste se puede sobrecalentar y es muy posible que deje de operar.

La Figura 3.6 muestra el esquema final de conexiones del regulador y de la caja de distribución.



Fig. 3.4 a) Construcción de los muros de una estación sísmológica.
b) Pilar donde se colocan los instrumentos sísmicos.
c) Malla ciclónica exterior.
Imágenes proporcionadas por F. Navarro.

El sistema de alimentación de DC para equipos de telecomunicaciones de una estación sísmológica del SSN, cuenta con un rectificador marca MEI modelo KCR 12-12. Éste se encarga de la alimentación de los equipos de telecomunicaciones y puede funcionar como cargador de baterías. En las estaciones del SSN se utilizan baterías de 12 Vdc a 200 Ah de capacidad.

Las estaciones sismológicas del SSN pueden funcionar incluso si se presenta algún corte de energía comercial. Éstas cuentan con un sistema de respaldo de energía (UPS) tipo AC y DC.



Fig. 3.5 Construcción de la tierra física. Imágenes proporcionadas por F. Navarro.

El UPS que entrega electricidad en AC, se utiliza para mantener el funcionamiento del equipo de comunicación satelital. El SSN posee un UPS marca Eaton, modelo 5P1150. Este equipo puede soportar casi una hora y media de operación en caso de un corte de energía. Además, puede mandar notificaciones de fallas eléctricas a los correos del personal del SSN.

El UPS marca SolarCraft proporciona alimentación eléctrica DC al receptor del GPS diferencial, en caso de un fallo eléctrico.



Fig. 3.6 Conexión del regulador y de la caja de distribución. Proporcionada por F. Navarro.

La Figura 3.7 muestra el rectificador y el UPS de AC y las conexiones del UPS de DC.

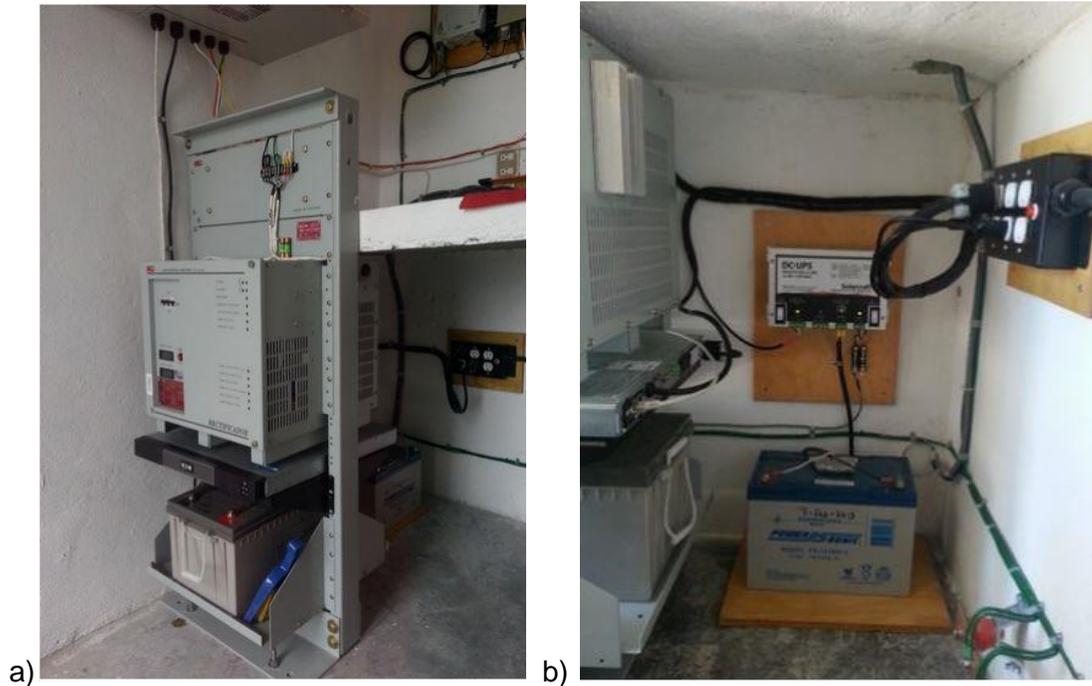


Fig. 3.7 a) Rectificador y el UPS de AC. b) Conexión del UPS de DC. Fotografías proporcionadas por F. Navarro.

3.2.3 Instalación de sensores y equipo sísmico

Actualmente, la RBA utiliza sensores de banda ancha. El modelo STS-2 fabricado por Streckeisen es el más común en las estaciones de banda ancha, tiene un rango de respuesta plana de 120 segundos a 10 Hz. También se cuenta con el sensor Nanometrics Trillium 240 con respuesta plana desde 240 segundos a 35 Hz. La Figura 3.8 muestra los sensores mencionados anteriormente.

Otros sensores utilizados son de la marca Guralp, modelos CMG 3T con respuesta plana de 120 s a 50 Hz, CMG 40T con respuesta plana de 30 s a 50Hz y CMG 6TD con respuesta plana de 30 s a 100 Hz; no obstante, sólo el modelo CMG 3T tienen una respuesta similar a los modelos STS-2 y el Trillium 240. La Tabla 3.1 resume la respuesta de algunos velocímetros.

Tabla 3.1 Respuesta en frecuencia de los velocímetros.

Modelo	Respuesta
STS-2	120 s - 10 Hz
Trillium 240	240 s - 35 Hz
CMG 3T	120 s - 50 Hz
CMG 40T	30 s - 50 Hz
CMG 6TD	30 s - 100 Hz

En cuanto a los sensores de aceleración, se utilizan dos modelos de la marca Kinimetrics, el ES-T y el FBA-23.



Fig. 3.8 Sensores de velocidad STS-2 (izquierda) y Trillium 240 (derecha).

Los sensores de una estación de banda ancha llevan una base de un material llamado arborón. Éste posee buenas propiedades eléctricas y mecánicas. La Figura 3.9 muestra el procedimiento de instalación de la base de los sensores en el pilar.



Fig. 3.9 Procedimiento de instalación de la base de los sensores. Proporcionada por F. Navarro.

Después de haber colocado la base de los sensores, se busca orientar las componentes en dirección del norte geográfico. Para orientar el sensor se puede utilizar una brújula o usar un giroscopio.

Se debe contemplar la declinación magnética para el sitio seleccionado. La Figura 3.10 muestra la Carta Magnética de Declinación para la República Mexicana. La Figura 3.11 muestra cómo corregir la brújula por declinación, también muestra el mapa mundial de las líneas isogónicas (de igual declinación magnética) del campo magnético.

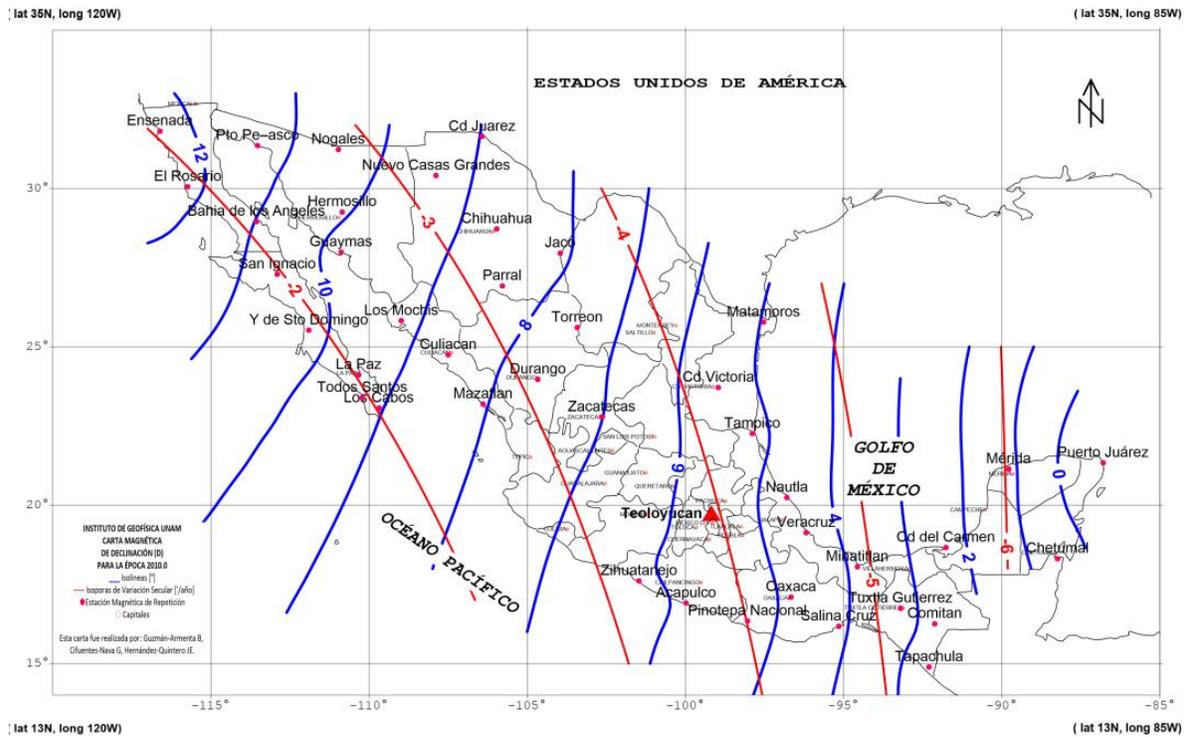


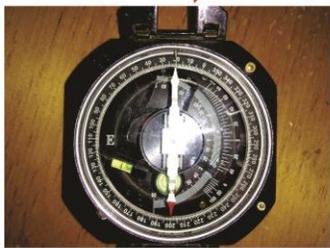
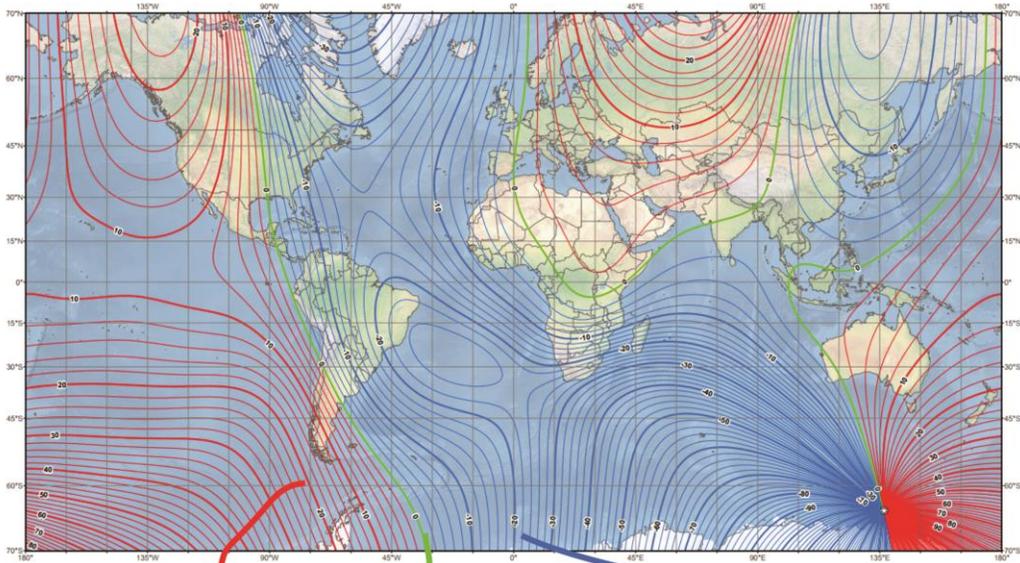
Fig. 3.10 Carta Magnética de Declinación. Imagen tomada del Servicio Magnético Mexicano (SMM) <http://www.geofisica.unam.mx/magnetico/assets/d-2010b.pdf>.

La medición tiene que hacerse fuera de la caseta, ya que la estructura metálica de la construcción afectará la medición. Se debe tomar en cuenta la manera de poder llevar la referencia hasta el pilar de los instrumentos. Una forma de reducir el error es trasladar la línea de referencia con un láser y un juego de reglas y escuadras.

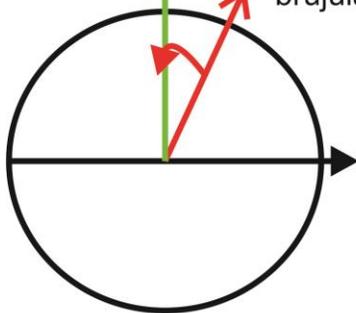
La otra forma de orientar una estación es con el uso de un giroscopio, al final de este capítulo se explica a detalle su funcionamiento. Éste es el mejor método para orientar los sensores, ya que no es influenciado por factores externos y se puede colocar el instrumento cerca del pilar, reduciendo la incertidumbre en el trazado de líneas. La Figura 3.12 muestra ambos métodos para orientar los sensores de las estaciones de banda ancha.

Para concluir la instalación de los sensores, se coloca una base de vidrio bajo el sensor de velocidad con el objetivo de aislar aún más la humedad y para proteger de alguna posible descarga. Ya que se tienen los sensores orientados y cableado al digitalizador, se cubren los sensores con una caja de aluminio como en la Figura 3.13.

US/UK World Magnetic Model - Epoch 2015.0
Main Field Declination (D)



N.G. medición brújula



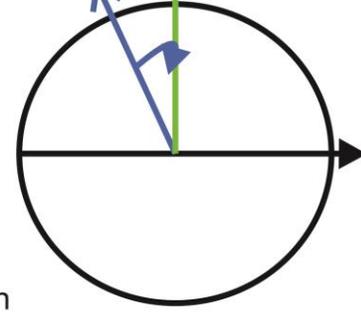
Declinación Este +



medición N.G. brújula



Giro antihorario = Declinación Este.
Giro horario = Declinación Oeste.



Declinación Oeste -

Fig. 3.11 Corrección de brújula por declinación. Para países con declinación Oeste (azul) la corrección por declinación magnética se compensa rotando el tornillo de la brújula en sentido horario (-). Para países con declinación Este (rojo) la corrección se realiza rotando el tornillo en sentido antihorario (+). Imagen modifica de la NOAA, <https://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>.



Fig. 3.12 Norte geográfico. *Izquierda: Orientación del sensor con brújula. Derecha: orientación del sensor con giroscopio. Imagen proporcionada por F. Navarro.*



Fig. 3.13 Sensores de velocidad (izquierda) y aceleración (derecha). *Imagen proporcionada por F. Navarro.*

Lo siguiente es comentar sobre el digitalizador sísmico. En las estaciones de banda ancha se utilizan digitalizadores marca Quanterra, el modelo más viejo es el Q680 LT/G, mientras que el modelo más reciente es el Q330S+. El Q330S+ tiene muy alta resolución y bajo consumo de energía, tiene capacidad de 3 a 6 canales sismológicos. Tiene muestreos de hasta 1 KHz y su consumo de energía en una estación de banda ancha es de aproximadamente 1 watt.

El SSN cuenta con un cuarto de pruebas para calibrar y probar los sensores nuevos. La Figura 3.14 muestra este cuarto.

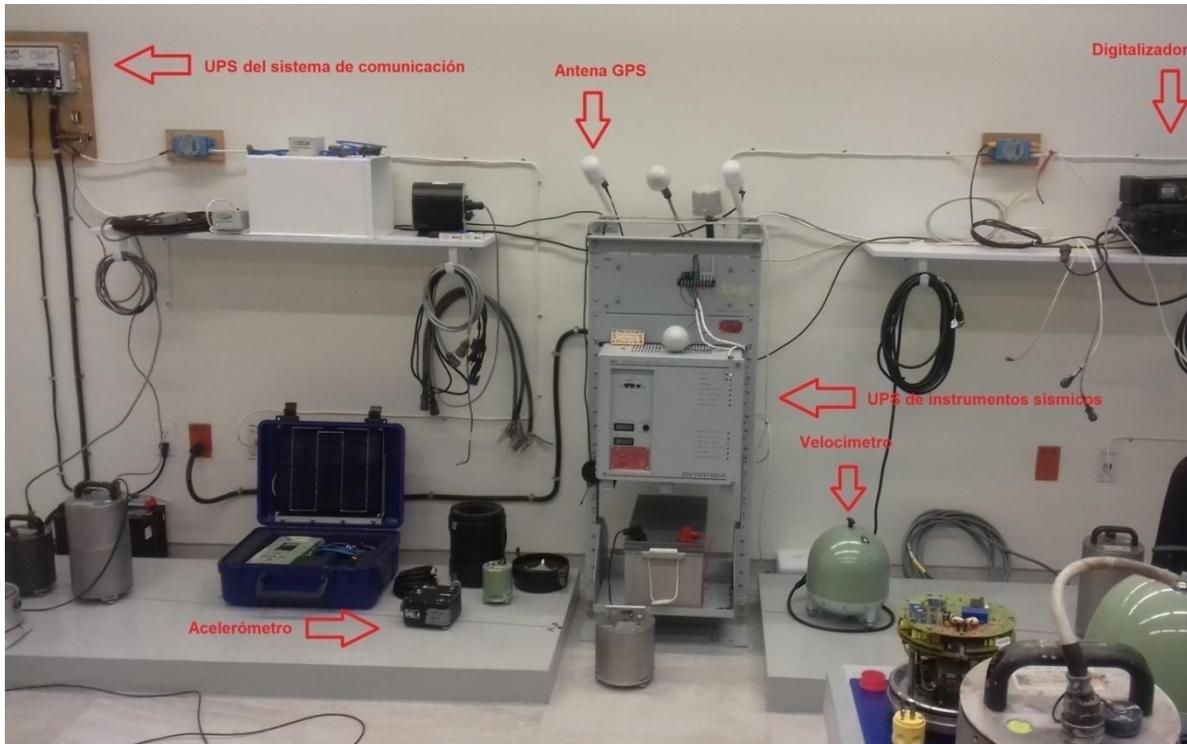


Fig. 3.14 Cuarto de prueba, ubicado en el departamento de instrumentación del SSN. Aquí se prueba el correcto funcionamiento de los instrumentos de una estación sísmica antes de su instalación.

El buen funcionamiento de todos estos sistemas instrumentales permite el monitoreo en tiempo real de la sismicidad en el país. La Figura 3.15 muestra los pasos para la adquisición de señales sísmicas en tiempo real. Muestra los distintos modelos de acelerómetros, velocímetros y digitalizadores disponibles en las estaciones de la RBA.

3.3 Giroscopio

El giroscopio es un instrumento ampliamente utilizado en sistemas de navegación aérea y marítima. Provee información precisa y exacta sobre la orientación con respecto Norte verdadero. En el SSN se utiliza un giroscopio modelo Alphaminicourse para orientar los sensores triaxiales con respecto al Norte verdadero (Sur magnético).

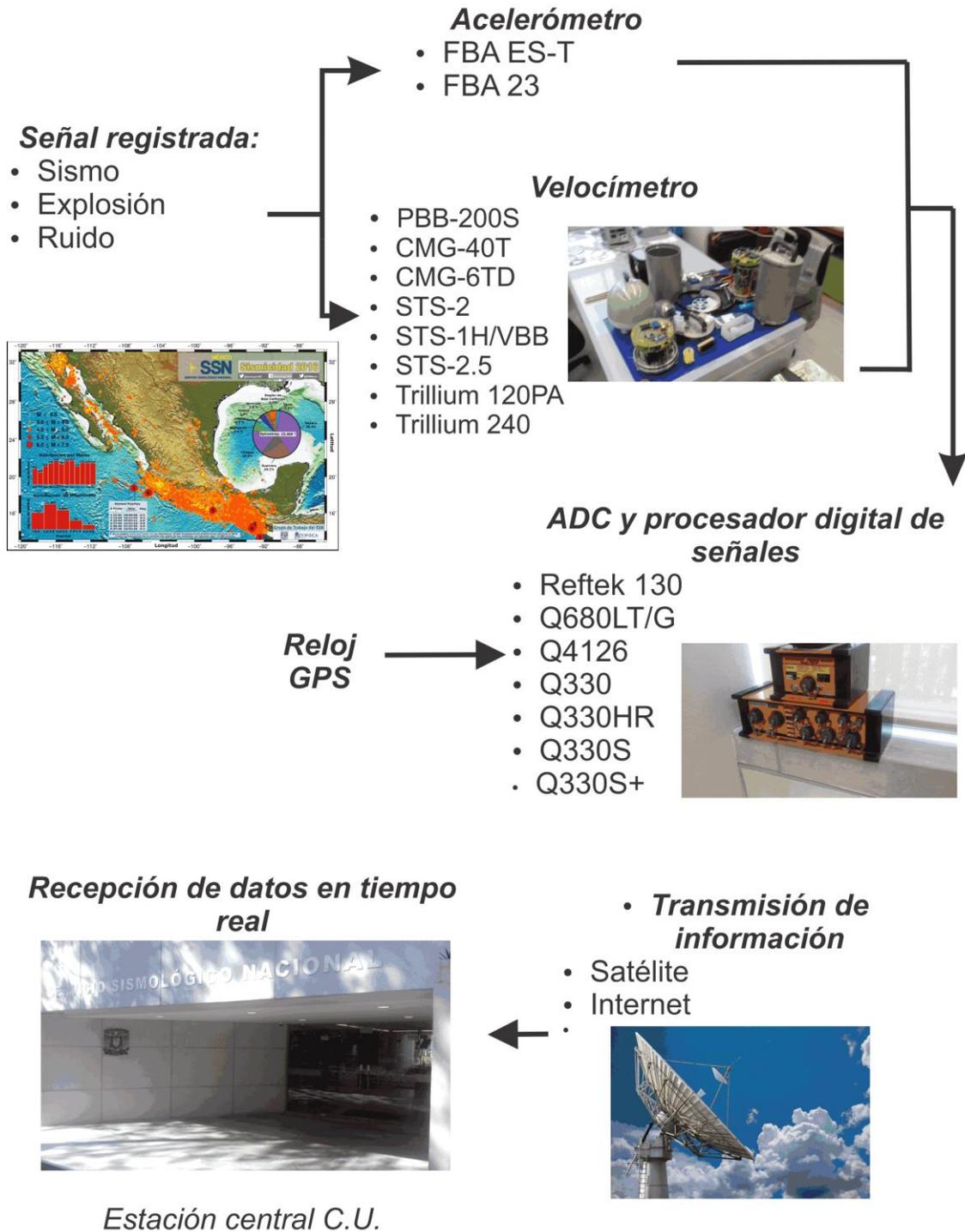


Fig. 3.15 Resumen del flujo de datos en tiempo real de la RBA.

La Tabla 3.2 lista las características técnicas del giroscopio.

Tabla 3.2 Características técnicas del giroscopio Alphaminicourse.

Voltaje	24 V DC (Rango aceptable 18V a 36 V DC)
Consumo de energía	3A encendido, 1A en continuo (100 W)
Rango	0.0 – 359.9 °
Resolución	0.1° ajustable a 0.01°
Temperatura de operación	- 15°C a +55° C
Temperatura de almacenamiento	-60° a +70 °C
Dimensiones	288 mm (H) x 240 mm(W) X 329 mm (D)
Peso	12.5 kg
Unidad de control (CU) (montaje externo)	96 mm (H) x192 mm (W) x 108 mm (D)
Peso unidad de control	3 kg

3.3.1 Principio de operación

Sin contemplar efectos externos, el rotor de un giroscopio libre de giro, trata de mantener fija una orientación en el espacio. El giroscopio Alphaminicourse utiliza esta propiedad y utiliza la rotación y la atracción gravitacional de la Tierra para alinear el eje de giro del giroscopio con el meridiano, que es la dirección del Norte verdadero.

Debido al principio físico para encontrar el norte con el giroscopio, la precisión depende de la dinámica de posicionamiento. Para disminuir el error, utiliza un receptor GPS y sensores de velocidad (*speed log*) para realizar correcciones en la latitud y la velocidad.

4 Orientación real de los sismómetros de la RBA

En el Capítulo 2 se describieron las bases teóricas que permiten realizar estimaciones del azimut inverso a partir de registros sísmicos. En este capítulo se describen a detalle las metodologías implementadas para estimar el error de orientación de los sismómetros utilizando los registros sísmicos, así como los resultados obtenidos.

4.1 Antecedentes

En el Capítulo 3 se describió la metodología que un ingeniero de campo utiliza para determinar la orientación del sensor durante la instalación del sismómetro encontrando el norte geográfico. Se vio que la más común, con el uso de una brújula magnética, puede conllevar un error significativo; mientras que la más precisa, con un giroscopio, resulta muy costosa.

En la sismología moderna, diversos estudios, tales como la inversión de mecanismos focales, funciones de receptor, análisis de modos normales, análisis de ondas superficiales o cualquier estudio que involucre la rotación de ejes coordenados, serán afectados por una mala orientación del sismómetro con respecto al norte geográfico. Por esta razón es fundamental conocer la orientación real de las estaciones que conforman la Red de Banda Ancha (RBA) del Servicio Sismológico Nacional (SSN).

La estimación y corrección de la mala orientación de los sensores triaxiales ha sido un problema fundamental en la sismología moderna. Autores como Laske y Master (1996), Chael (1997), Selby (2001), Baker y Stevens (2004) y Stachnik et al. (2012), proponen estimar la orientación del sensor utilizando ondas Rayleigh de periodo largo, de manera similar Ekström y Busby (2008) estiman la orientación del sensor al realizar la correlación de sismogramas sintéticos con los registros del instrumento.

Otra manera de estimar la orientación del sensor es utilizando ondas P y el análisis de componentes principales, como lo proponen Jurkevics (1988), Walck y Chael (1991), Fontain (2009), Niu y Li (2011) y Wang et al (2016).

Así, en este trabajo se busca conocer la orientación real del sismómetro en las estaciones de la RBA, por medio de la polarización de ondas Rayleigh, usando el algoritmo de Chael (1997) y Selby (2001), el cual compara la forma de onda de la componente radial con la transformada de Hilbert de la componente vertical y por medio del análisis de componentes principales, usando el algoritmo propuesto por Wang (2016); y por medio.

4.2 Estimación por medio de la polarización de ondas Rayleigh

La estimación del azimut inverso utilizando ondas superficiales tipo Rayleigh se fundamenta en el desfaseamiento de 90° que existe entre el desplazamiento registrado en la componente vertical y la componente radial.

Este método fue propuesto por Chael (1997) y Selby (2001). Consiste en encontrar el azimut inverso asociado con el máximo coeficiente de correlación de la componente vertical con la transformada de Hilbert de la componente radial. Este algoritmo es conocido como algoritmo CS.

En ese trabajo se propone utilizar la expresión propuesta por Selby (2001), como coeficiente de correlación la expresión,

$$C = \int_{t_1}^{t_2} u_r u_{zz} dt, \quad (4.1)$$

donde u_r es la componente radial y u_{zz} es la transformada de Hilbert de la componente vertical.

Se tiene un segundo coeficiente de correlación, Stachnik et al. (2012), cuya expresión es

$$C^* = \int_{t_1}^{t_2} S_{zr} S_{zz} dt, \quad (4.2)$$

donde S_{zr} es la correlación de la transformada de Hilbert de la componente vertical y la componente radial, mientras que S_{zz} es la autocorrelación de la transformada de Hilbert de la componente vertical; y se define cómo

$$S_{ij} = \sum_{\tau=1}^N x_j(\tau) x_k(\tau). \quad (4.3)$$

Se implementa realizando el cálculo de los coeficientes para incrementos de 1° del azimut inverso hasta 360°. El azimut inverso estimado se encuentra cuando C y C^* son máximos (Figura 4.1).

La corrección del sensor (Figura 4.2) se obtiene a partir de

$$X = seaz - \theta, \quad (4.4)$$

donde X es la corrección del sensor, $seaz$ es el azimut inverso y θ es el ángulo de máxima correlación.

4.3 Estimación por medio del análisis de componentes principales

El método de análisis de componentes principales (PCA) es una técnica estadística multivariable que permite reducir la dimensión, extraer información de interés y encontrar patrones en los datos. Es la técnica multivariable con mayor antigüedad, no obstante, el concepto de componentes principales fue formalizado en 1933 por Hotelling (Abdi y Williams, 2010).

Las componentes principales se calculan al obtener la matriz de covarianza del conjunto de datos, posteriormente se obtienen los eigenvalores y eigenvectores de la matriz de covarianza y se ordenan del mayor al menor eigenvalor.

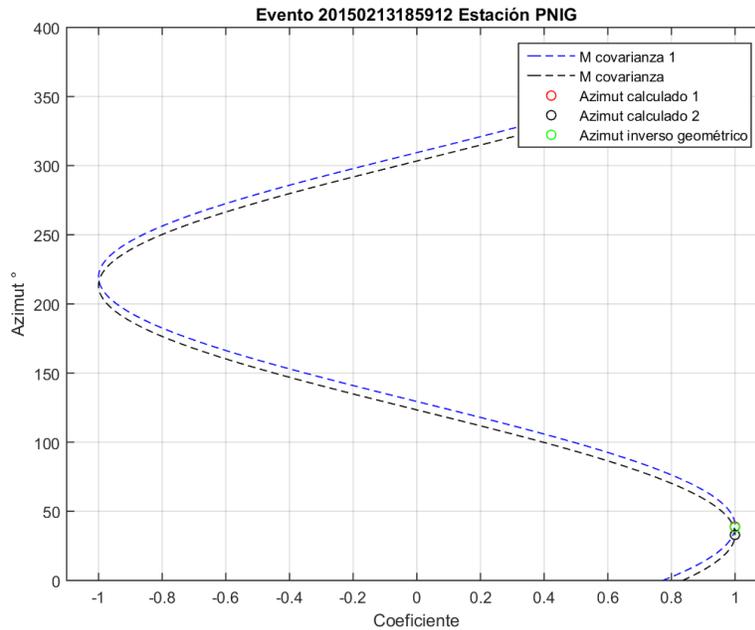


Fig. 4.1 Coeficientes de correlación normalizados, en función del azimut, se muestran los máximos en rojo y verde que coinciden con el azimut geométrico (verde). Al restar el azimut geométrico con el azimut estimado se obtiene la corrección de la estación.

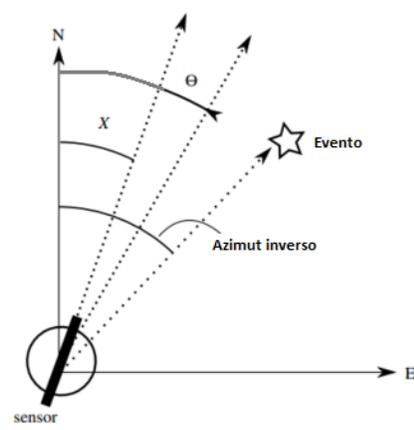


Fig. 4.2. Corrección al sensor. Figura modificada de Stachnik et al. (2012).

El método de PCA es una transformación lineal que mapea el conjunto de datos a un nuevo sistema coordenado (componentes principales). Las componentes principales son funciones lineales de las variables originales. La mayor variación de cualquier proyección de los datos se ubica en la primera componente principal, la segunda mayor variación en la segunda componente principal y así sucesivamente.

La estimación del azimut inverso utilizando el análisis de componentes principales, fue propuesta por Niu y Li (2011). Este método supone que para una onda P que viaja en un

medio estratificado, el desplazamiento de la partícula se encuentra contenido en un plano vertical que une la fuente con el receptor, y que la proyección a un plano horizontal es paralela al azimut inverso del evento. Otra consideración importante es que las tres componentes del sensor de velocidad son ortogonales, y la componente vertical es ortogonal al suelo.

La Figura 4.3 muestra una estación mal orientada ϕ grados en sentido horario, el azimut aparente θ_a se define como

$$\theta_a = \theta_c - \phi, \quad (4.5)$$

donde θ_c es el azimut geométrico. Para calcular el azimut aparente, primero se calcula la matriz de covarianza de las dos componentes horizontales del sensor,

$$c_{ij} = \int_0^T u_i(t)u_j(t)dt, \quad i, j = 1,2. \quad (4.6)$$

En este caso, T es la duración de la ventana elegida. En ausencia de ruido, la matriz de covarianza posee un eigenvalor distinto de cero y θ_a es la dirección correspondiente al eigenvector,

$$\theta_a = \cot^{-1} \left(\frac{c_{22} - c_{11} + \sqrt{(c_{11} - c_{22})^2 + 4c_{12}^2}}{2c_{12}} \right). \quad (4.7)$$

Se calcula el cociente entre los eigenvalores de la matriz de covarianza. Este parámetro se utiliza como relación señal a ruido, ya que en ausencia de ruido únicamente existe un eigenvalor distinto de cero (Niu y Li, 2011).

Finalmente, para obtener la estimación del error de orientación de ese evento se utiliza la expresión

$$\phi = \theta_c - \theta_a. \quad (4.8)$$

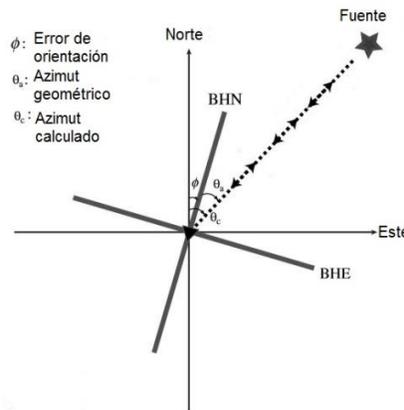


Fig. 4.3 Corrección al sensor, modificada (Wang et al., 2016)

4.4 Aplicación de las metodologías a los datos

A continuación se describe la aplicación de la metodología para estimar el error de orientación de los sismómetros de la RBA, empleando sus datos (SSN, 2017).

Para estimar la orientación con el algoritmo CS se siguen los siguientes pasos:

1. Se seleccionan eventos registrados en las estaciones para distancias mayores que 30° , profundidad menor que 100 km y magnitud mayor que 6.0.
2. Se corrigen los registros sísmicos por línea base, se remueve la tendencia y se filtran los registros en una banda angosta [0.02 - 0.04] Hz.
3. Para seleccionar la ventana de ondas superficiales, se calcula el espectrograma del evento y se obtiene el tiempo en el cual se registra la mayor amplitud en el dominio de la frecuencia.
4. A partir del tiempo obtenido con el espectrograma (Figura 4.4), se aplica una ventana Coseno (Tukey) con 10% de 660 s.
5. Se implementa el algoritmo CS para obtener el azimut teórico y se compara con el azimut geométrico, obteniéndose un factor de corrección por evento.
6. Se estima un factor para cada uno de los eventos seleccionados y se toma la mediana (percentil 50%) de todas las estimaciones como el error de orientación que tiene el sismómetro de esa estación.

Para el análisis de componentes principales (PCA), se siguen los siguientes pasos:

1. Se seleccionan eventos registrados en las estaciones para distancias entre 30° y 90° y magnitud mayor que 5.5.
2. Se corrigen los registros sísmicos por línea base y se remueve la tendencia, posteriormente se aplica un filtro pasa-banda con frecuencias de corte [0.02 - 0.1] Hz.
3. Para seleccionar la ventana que contiene a la fase P (Figura 4.5), se calcula el tiempo de arribo teórico con el programa Tau-P (Crotwell et al., 1999). Se aplica el algoritmo de picado automático propuesto por Baillard (2014) e implementado por M. A. Rodríguez Domínguez y se compara con el arribo calculado con Tau-P. Si existe una diferencia de más de 5 s entre aquel definido con Tau-P y el identificado por el algoritmo de Baillard (2014), se selecciona el tiempo calculado con Tau-P.
4. Se aplica entonces una ventana Coseno de 10% con duración de 11 s que da inicio medio segundo antes del tiempo de arribo de la fase P.
5. Se implementa el algoritmo PCA sobre la ventana seleccionada para obtener el azimut inverso teórico, calculando el cociente entre eigenvalores (Figura 4.6) para obtener la relación señal a ruido del evento y se compara con el azimut geométrico, obteniéndose un factor de corrección para ese evento.
6. Se obtienen estimaciones para todos los eventos seleccionados y se toma la mediana (percentil 50%) de todas ellas como el error de orientación que tiene el

sismómetro de esa estación.

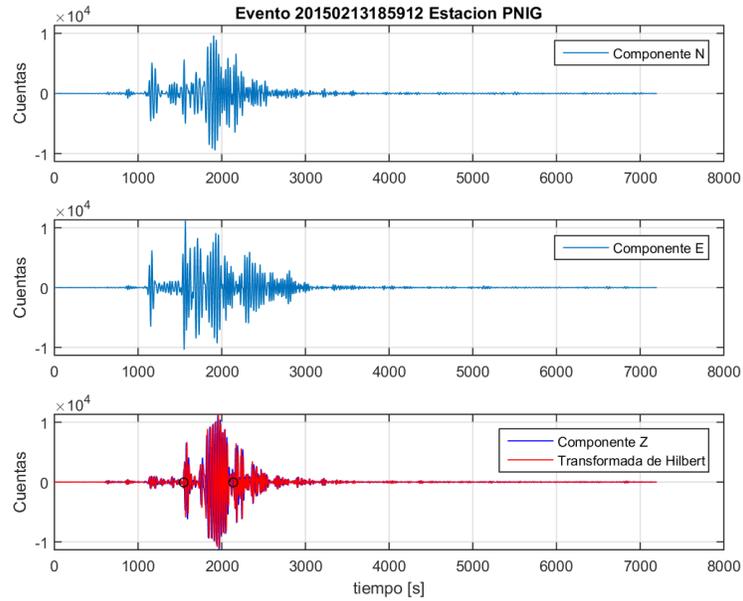


Fig. 4.4. Ventana seleccionada. Componentes del evento y ventana de onda superficiales seleccionada para la estimación del azimut inverso, usando el algoritmo CS.

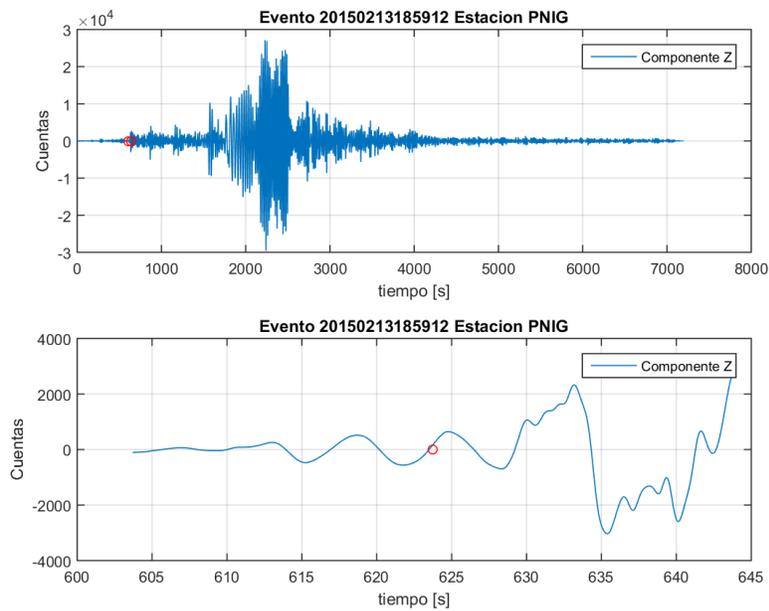


Fig. 4.5. Ventana seleccionada. Componente vertical del evento y ventana seleccionada para el

análisis de componentes principales.

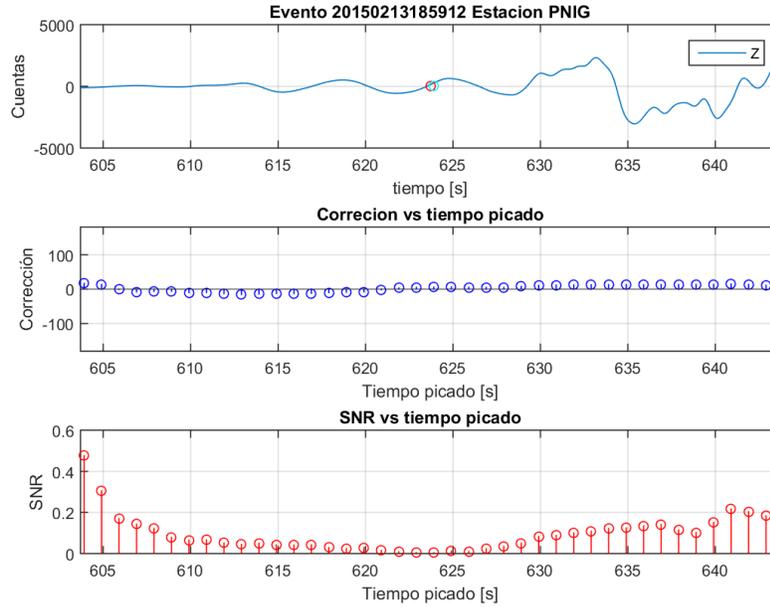


Fig. 4.6. Ventana de la fase P para el análisis de componentes principales. En azul se muestra la estimación de la corrección en función del tiempo picado; en rojo, la variación de la relación señal a ruido en función del tiempo picado.

En la Tabla 4.1 se comparan las estimaciones realizadas para la estación Pinotepa Nacional, Oaxaca (PNIG), usando el evento mostrado en la Figura 4.7. Se puede observar que el tiempo seleccionado para el arribo de la fase P coincide con valores bajos en la relación señal a ruido (Figura 4.6). La relación señal a ruido para este trabajo se define como (Wang et al., 2016)

$$SNR = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \tag{4.9}$$

donde λ_1 y λ_2 son los valores característicos de la matriz de covarianza (Ecuación 4.6).

De la Tabla 4.1 se deduce que las estimaciones del azimut inverso para ambos métodos coinciden con el azimut geométrico para el evento de la Figura 4.6. Se realizó lo mismo para todos los eventos del catálogo generado para esa estación. Finalmente se selecciona al percentil 50 (mediana) como estimación de la corrección (Figura 4.8).



Fig. 4.7. Evento ubicado en la parte norte de la dorsal del Atlántico, con fecha 13 de febrero del 2015 con hora 18:59:12 UTC, latitud = 52.649°N longitud = 31.902°W, profundidad = 16.7 km, $M_{ww} = 7.1$, imagen tomada de la página del USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb000tp5q#executive>.

Tabla 4.1 Estimación para el evento de la Figura 4.6.

Método	Estimación del Azimut inverso	Corrección estimada
Ondas Rayleigh 1	39°	5.96
Ondas Rayleigh 2	33°	-0.32
Componentes principales	32.71°	-0.71

4.5 Estimaciones por época

Las estimaciones de la corrección se realizaron para distintas épocas. Cada época fue acotada por cambios en el sensor de velocidad, en el digitalizador o por una reorientación de sensor efectuada por los ingenieros de campo. La Figura 4.9 muestra el mapa de las estaciones de la RBA del SSN que se analizaron.

Para algunas estaciones, como Cayaco (CAIG), Comitán (CCIG), Matías Romero (CMIG), Ciudad Universitaria (CUIG), La Paz (LPIG), Mazatlán (MAIG), Oaxaca (OXIG), Platanillo (PLIG), Pinotepa Nacional (PNIG) y Yauatepec (YAIG), la primera época comienza en el 2001 a pesar de que la operación de la estación fue previa a este año. Esto se debe a que a partir de ese año se tienen registros digitales continuos disponibles en el servidor del SSN.

Se ejemplifica la estimación por época para el velocímetro de la estación de Ciudad Universitaria (CUIG), en Ciudad de México. Para el resto de las estaciones, se pueden

consultar los resultados en el Anexo 2.

En las figuras 4.10 y 4.11 se muestran las estimaciones realizadas con el método de polarización de ondas Rayleigh y con el análisis de componentes principales, respectivamente. La primera época inicia el 17 de diciembre del 2002 con la instalación del sensor de velocidad y digitalizador y termina el 14 de febrero del 2013, fecha en la cual se midió la orientación real del sensor de velocidad con el giroscopio y se reorientó el instrumento. La segunda época inicia ese mismo día, con el sensor correctamente orientado y concluye con el 14 de febrero del 2016, fecha en la cual se hizo el corte de datos para la realización de este trabajo.

Para la época I, la orientación estimada del velocímetro coincide con la medida con el giroscopio, 13.1° . Para la época II, las estimaciones coinciden con el Norte Geográfico. Éste es un claro efecto de que la estación fue reorientada correctamente.

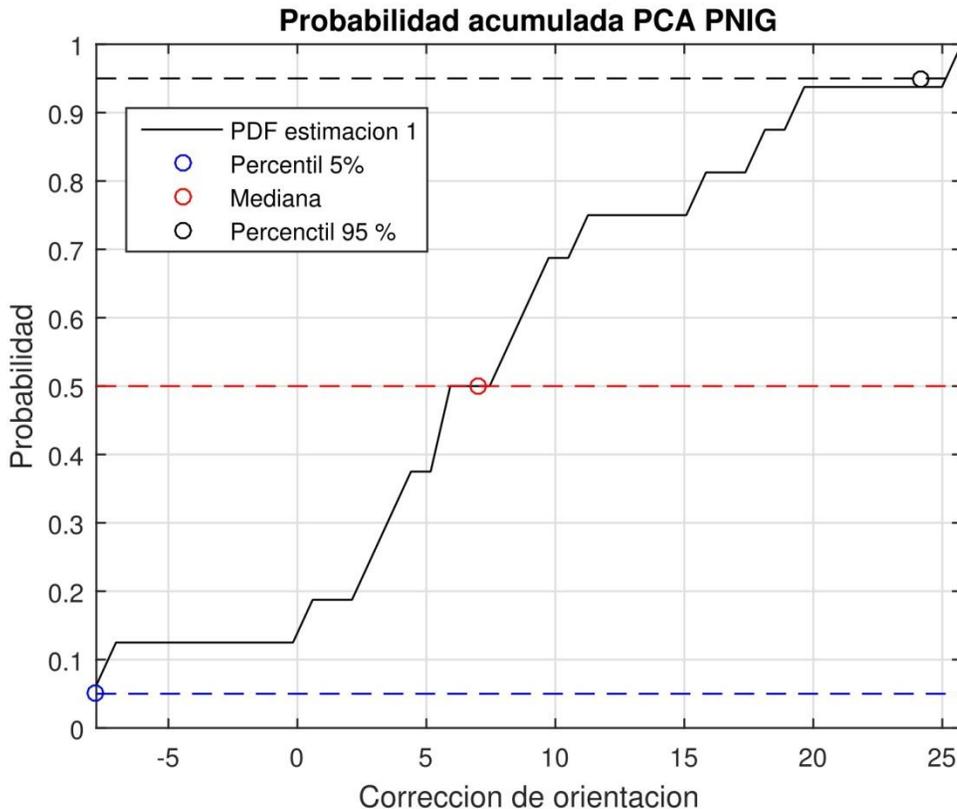


Fig. 4.8. Probabilidad acumulada, para la estación PNIG. En rojo se muestra la mediana, en azul el percentil 5 y en negro el percentil 95.

Velocímetros de la RBA del SSN

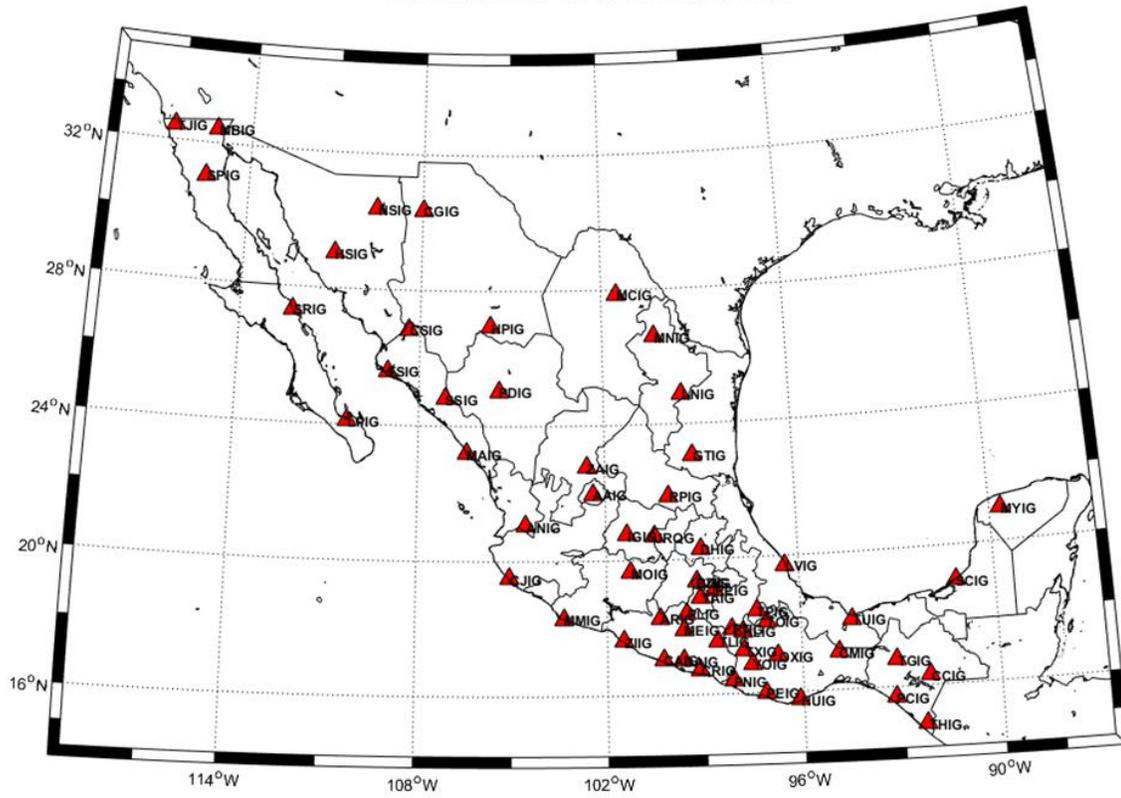


Fig. 4.9 Ubicaciones las estaciones de la RBA del SSN para las cuales se estimó la orientación del sensor de velocidad.

4.6 Orientaciones de las estaciones en la última época

En esta sección se muestran las estimaciones obtenidas con ambos métodos. Se obtuvieron estimaciones para 59 de los 63 sismómetros que conforman la RBA. Por falta de un número significativo de eventos se excluyeron las estaciones ACIG (Acambay), BCIG (La Boquilla), MGIG (Malinaltepec) y TEIG (Tepich).

La Figura 4.12 muestra las estimaciones obtenidas para las primeras 20 estaciones con el método de polarización de ondas Rayleigh para la última época antes de que la orientación fuera corregida por los ingenieros de campo empleando un giroscopio. La Figura 4.13 muestra, de igual manera, muestra las estimaciones obtenidas para la última época, pero obtenidas con el método PCA. En el Anexo 1 se listan todas las estimaciones para la época previa a la corrección con el giroscopio.

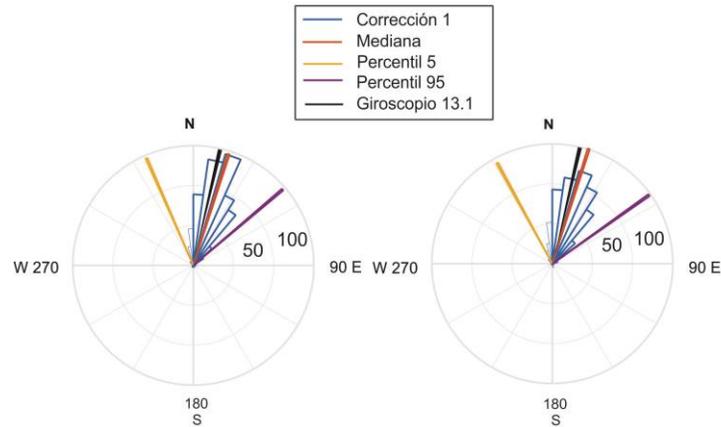
Wang et. al. (2016) proponen un límite inferior y uno superior de $\pm 5^\circ$ para agrupar estaciones que tengan un error de orientación aceptable.

Ciudad Universitaria, Ciudad de México (CUIG)

Época I

Fecha: 17/12/2002 - 14/02/2013
Digitalizador : Q680LT/G
Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Época II

Fecha: 14/02/2013 - 14/02/2016
Digitalizador : Q680LT/G
Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

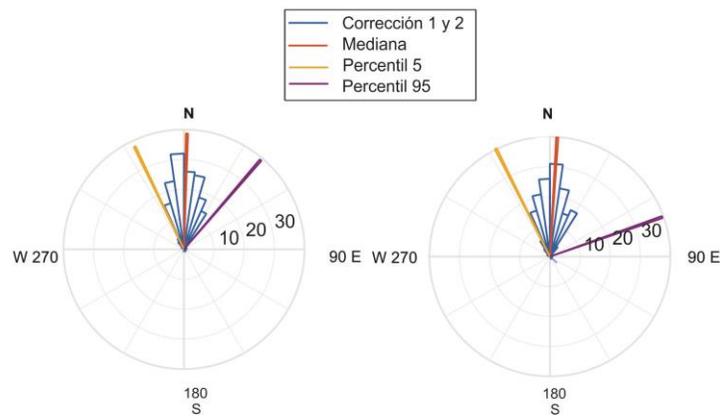


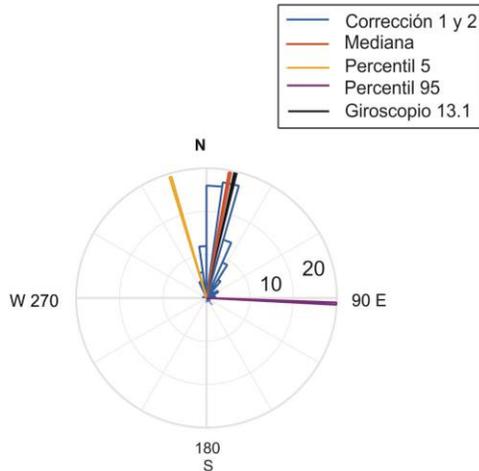
Fig. 4.10 Estimación de la orientación, con polarización de ondas Rayleigh, para el velocímetro de la estación CUIG. La mediana de las estimaciones para la primera época es de 17.5° y 17.6° . Para la segunda época, es de 1.8° y 3.8° . Se reportó una corrección con el giroscopio de 13.3° .

Ciudad Universitaria, Ciudad de México (CUIG)

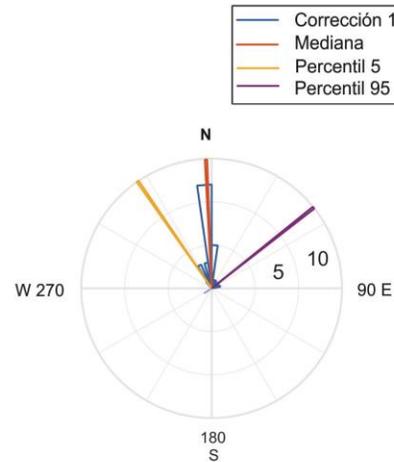
Época I

Estimación por medio de Componentes Principales

Época II



Fecha: 17/12/2002 - 14/02/2013
Digitalizador : Q680LT/G
Sensor de velocidad : STS-2 (G1)



Fecha: 14/02/2013 - 14/02/2016
Digitalizador : Q680LT/G
Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Fig. 4.11 Estimación de la orientación del velocímetro de la estación CUIG a partir del análisis de componentes principales. La mediana de las estimaciones para la primera época es de 10.9° . Para la segunda, es de -2.7° . Se reportó una corrección con el giroscopio de 13.3° .

En las figuras 4.14 a 4.17 se muestran las estimaciones obtenidas en las estaciones restantes.

La Figura 4.18 muestra el mapa de las estimaciones realizadas y se comparan con las medidas realizadas con el giroscopio. Se observa que para algunas zonas del país las estimaciones coinciden de manera parcial con el giroscopio, las diferencias entre el giroscopio y la estimación se pueden atribuir a anomalías en el ángulo de arribo (Foster et al., 2014).

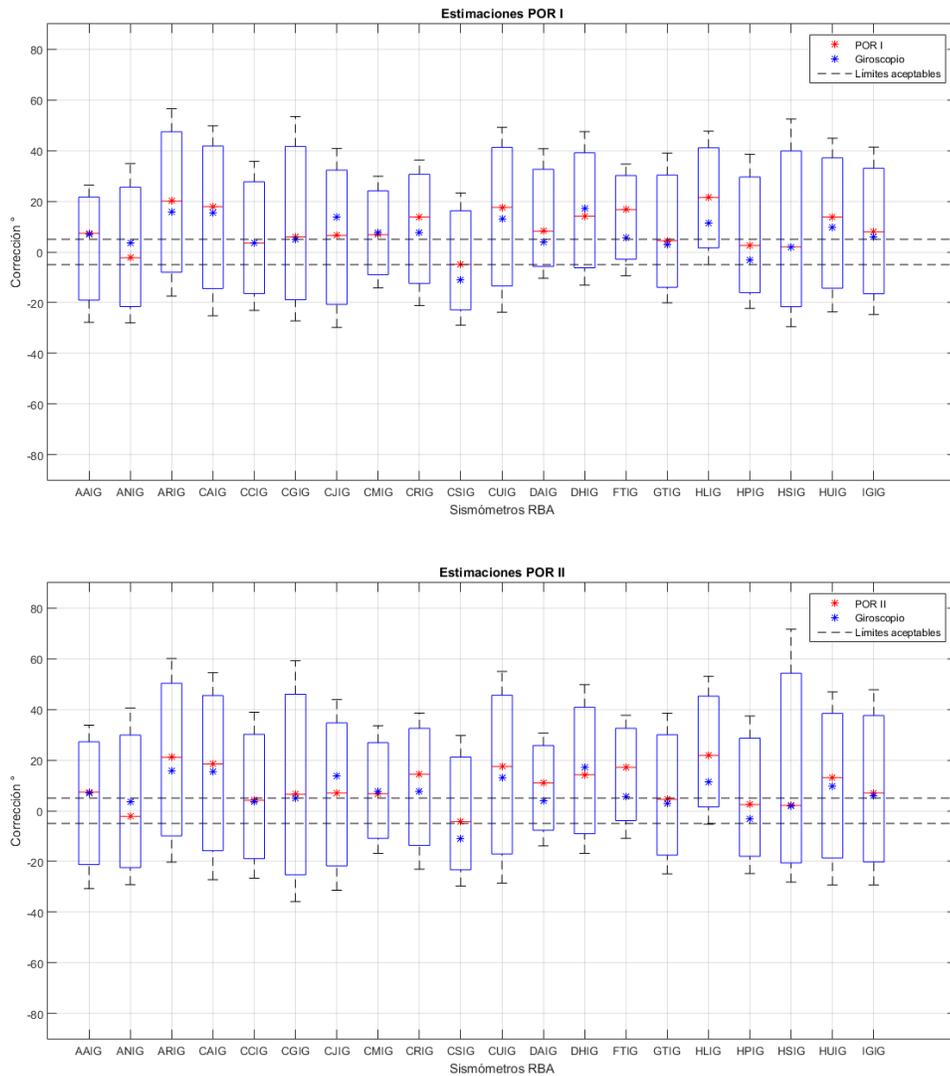


Fig. 4.12 a) Estimaciones obtenidas con el método POR 1 (rojo) y medidas in situ con el giroscopio (azul). b) Estimaciones obtenidas con el método POR 2 (rojo) y medidas in situ con el giroscopio. Las cajas azules representan la distancia entre el percentil 5 y el percentil 95.

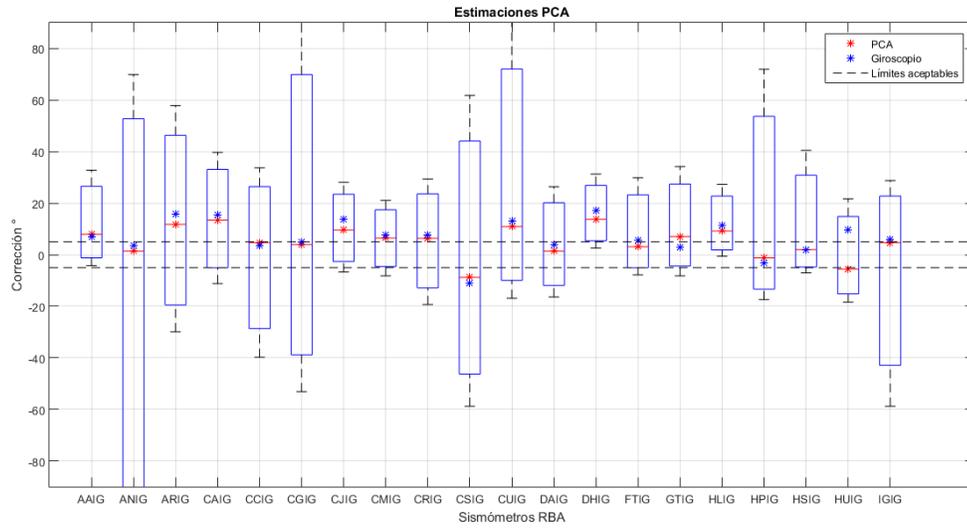


Fig. 4.13 Estimaciones obtenidas con el método PCA (rojo) y mediciones in situ con el giroscopio (azul). Las cajas azules representan la distancia entre el percentil 5 y el percentil 95.

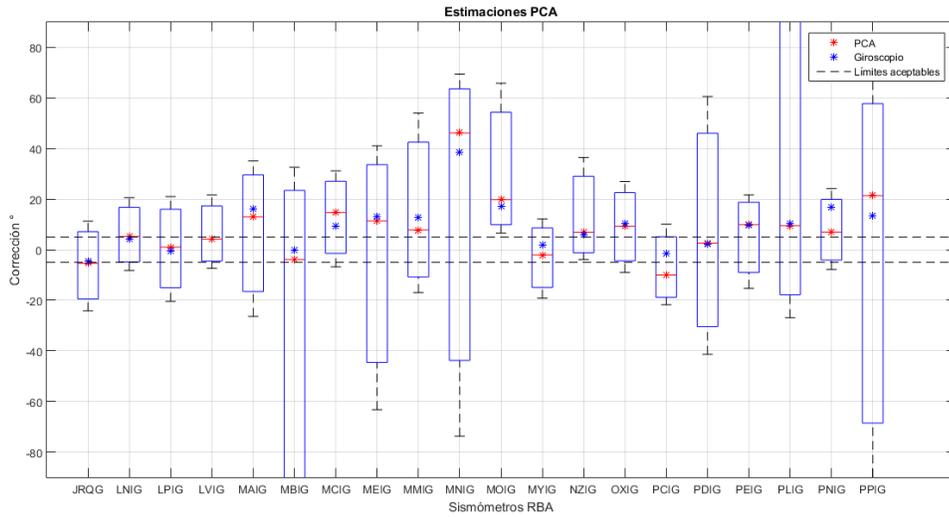


Fig. 4.14 Estimaciones obtenidas con el método PCA (rojo) y medidas in situ con el giroscopio (azul). Las cajas azules representan la distancia entre el percentil 5 y el percentil 95.

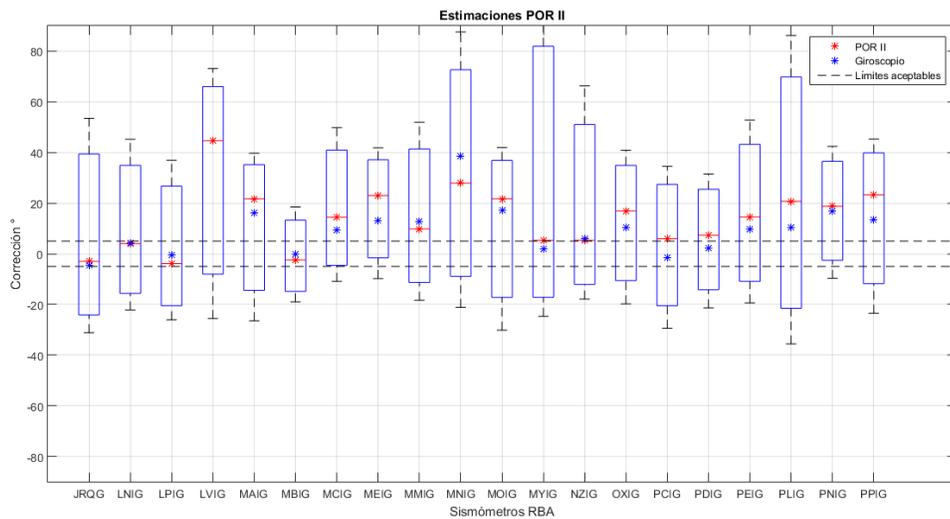
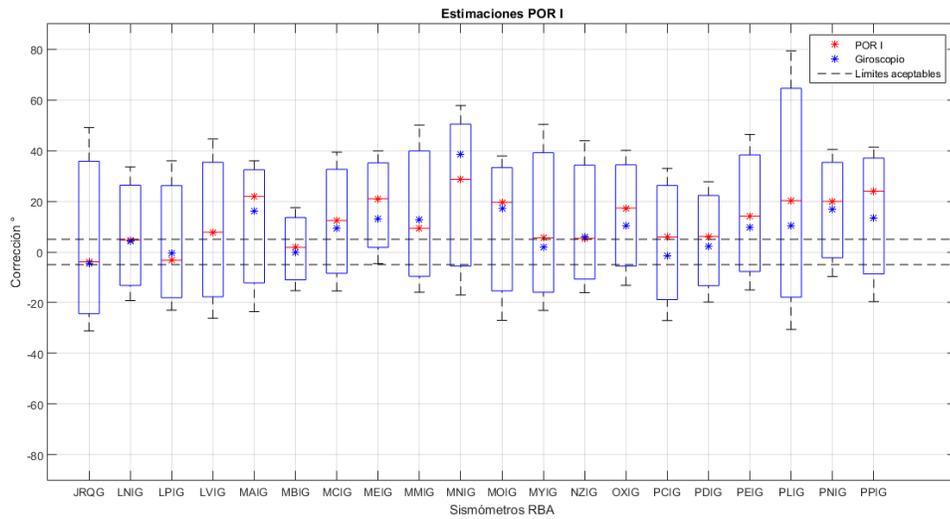


Fig. 4.15 a) Estimaciones obtenidas con el método POR 1 (rojo) y medidas in situ con el giroscopio (azul). b) Estimaciones obtenidas con el método POR 2 (rojo) y medidas in situ con el giroscopio (azul). Las cajas azules representan la distancia entre el percentil 5 y el percentil 95.

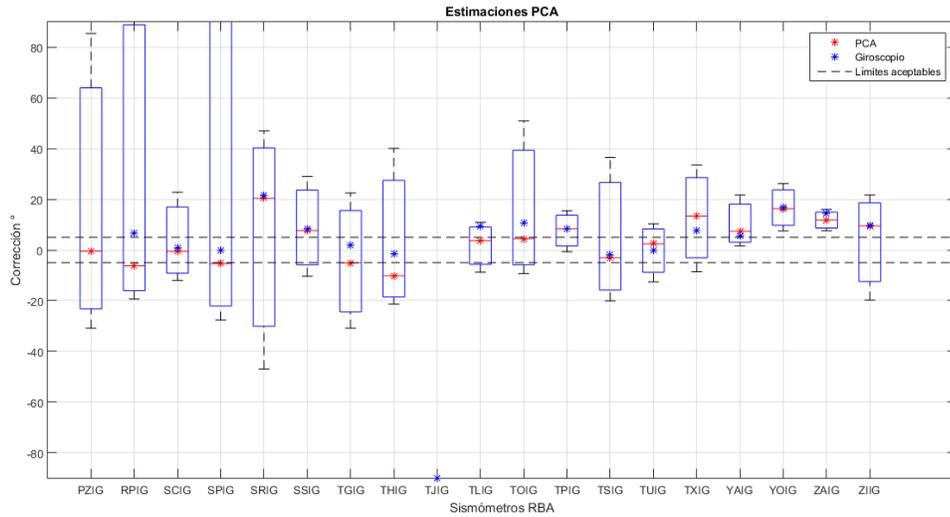


Fig. 4.16 Estimaciones obtenidas con el método PCA (rojo) y medidas in situ con el giroscopio (azul). Las cajas azules representan la distancia entre el percentil 5 y el percentil 95.

4.1 Anomalías de ángulo de arribo y su efecto en la estimación de la orientación con ondas Rayleigh

Larsone et al. (2002) y Foster et al. (2014) han estudiado las anomalías de ángulo de arribo para ondas superficiales. El trabajo de Larson determina las anomalías con ondas Love y Rayleigh, mientras que Foster, trabaja únicamente con ondas Rayleigh.

La polarización de las ondas Rayleigh es en conjunto la medida de la dirección (ángulo de arribo) y la elipticidad de la onda. Las anomalías en el ángulo de arribo resultan del gradiente de velocidad de la estructura que atraviesan y sugieren la presencia de una estructura de velocidad heterogénea (Foster et al.,2014). Trabajos previos han observado anomalías de hasta 15° (Lerner-Lam y Park,1989) y 5 °- 30° (Laske et al.,1994) para periodos entre 25-100 s.

Las estimaciones con el algoritmo CS fueron obtenidas con registros filtrados entre 25 - 50 s, por lo tanto, son afectadas por las anomalías de ángulo de arribo. La Figura 4.19 muestra anomalías de ángulos de arribo para distintos periodos. Para periodos de 100 s el ángulo teórico coincide con el observado, para periodos de 25 s las anomalías en el ángulo de arribo son más evidentes.

En la Figura 4.20 se muestran cuatro mapas de anomalías de ángulo de arribo para cuatro localidades distintas. El mapa de anomalías es diferente para cada caso y depende de la dirección del frente de onda. Las figuras 4.19 y 4.20 ejemplifican cómo las anomalías de ángulo de arribo pueden afectar en la estimación de la orientación de los sismómetros de la RBA del SSN.

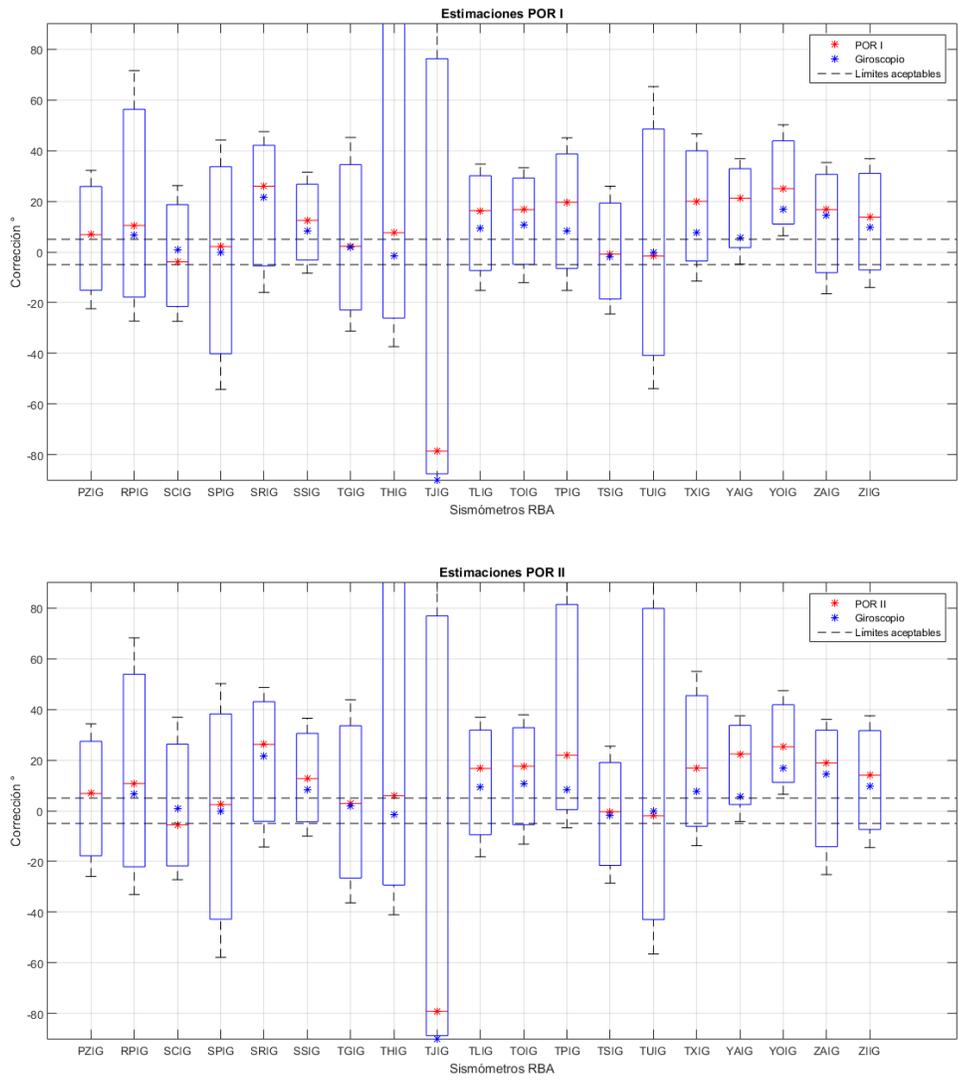
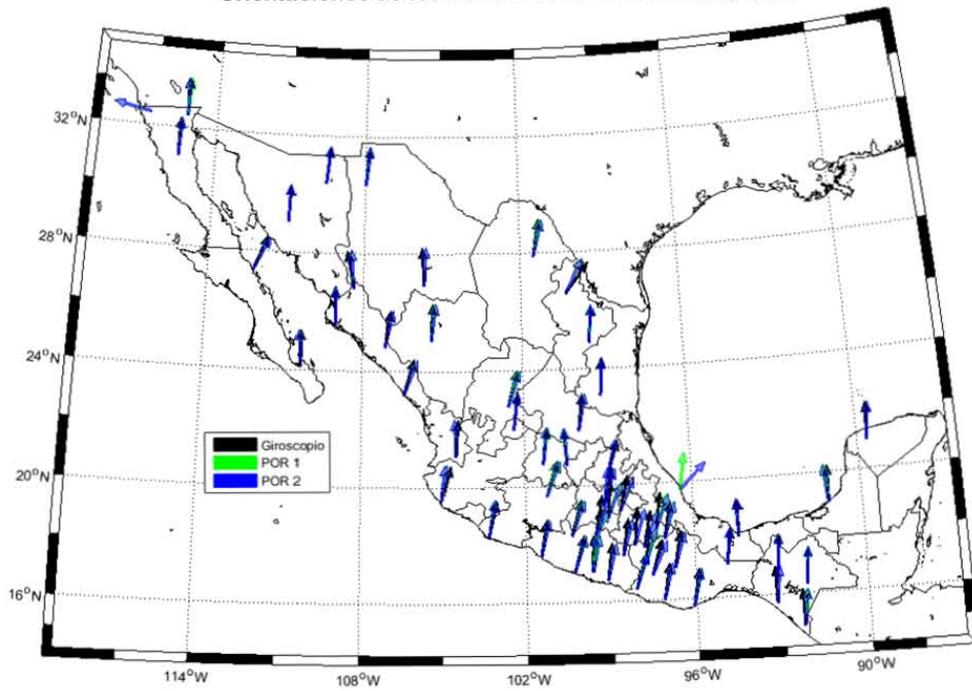


Fig. 4.17 a) Estimaciones obtenidas con el método POR 1 (rojo) y medidas in situ con el giroscopio (azul). b) Estimaciones obtenidas con el método POR 2 (rojo) y medidas in situ con el giroscopio (azul). Las cajas azules representan la distancia entre el percentil 5 y el percentil 95.

Orientaciones de los velocímetros de la RBA del SSN



Orientaciones de los velocímetros de la RBA del SSN

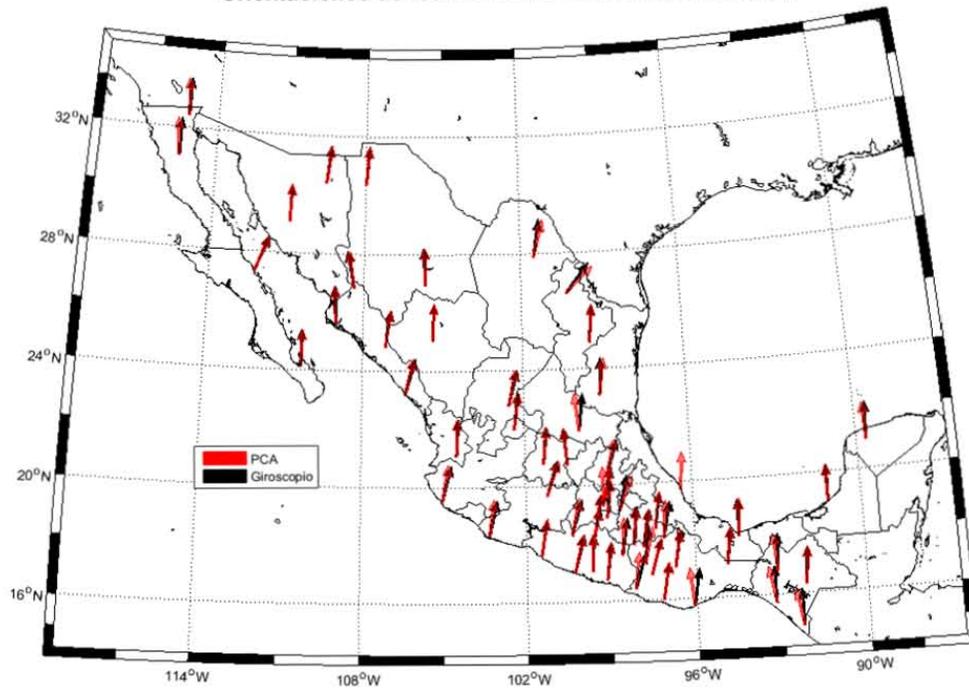


Fig. 4.18 Estimaciones con ondas superficiales (Algoritmo CS, POR 1y POR 2) y ondas de cuerpo (PCA).

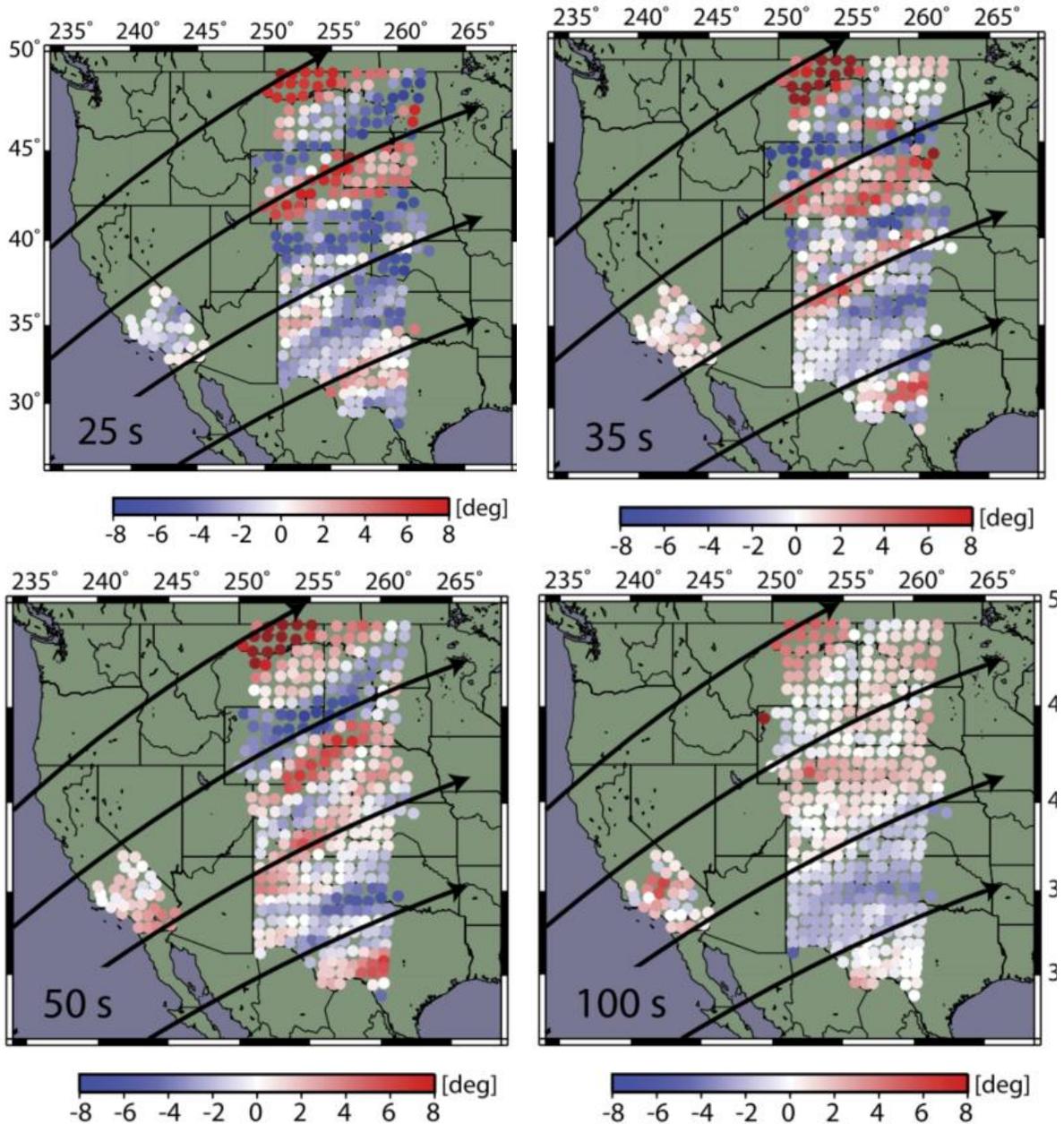


Fig. 4.19 Anomalías de ángulo de arribo estimadas con ondas Rayleigh para periodos de 25, 35, 50 y 100 s. Evento con coordenadas geográficas 16.45°S, 173.06°W cerca de Samoa. Las líneas en negro indican la dirección de propagación de la onda. Figura tomada de Foster et al. (2014).

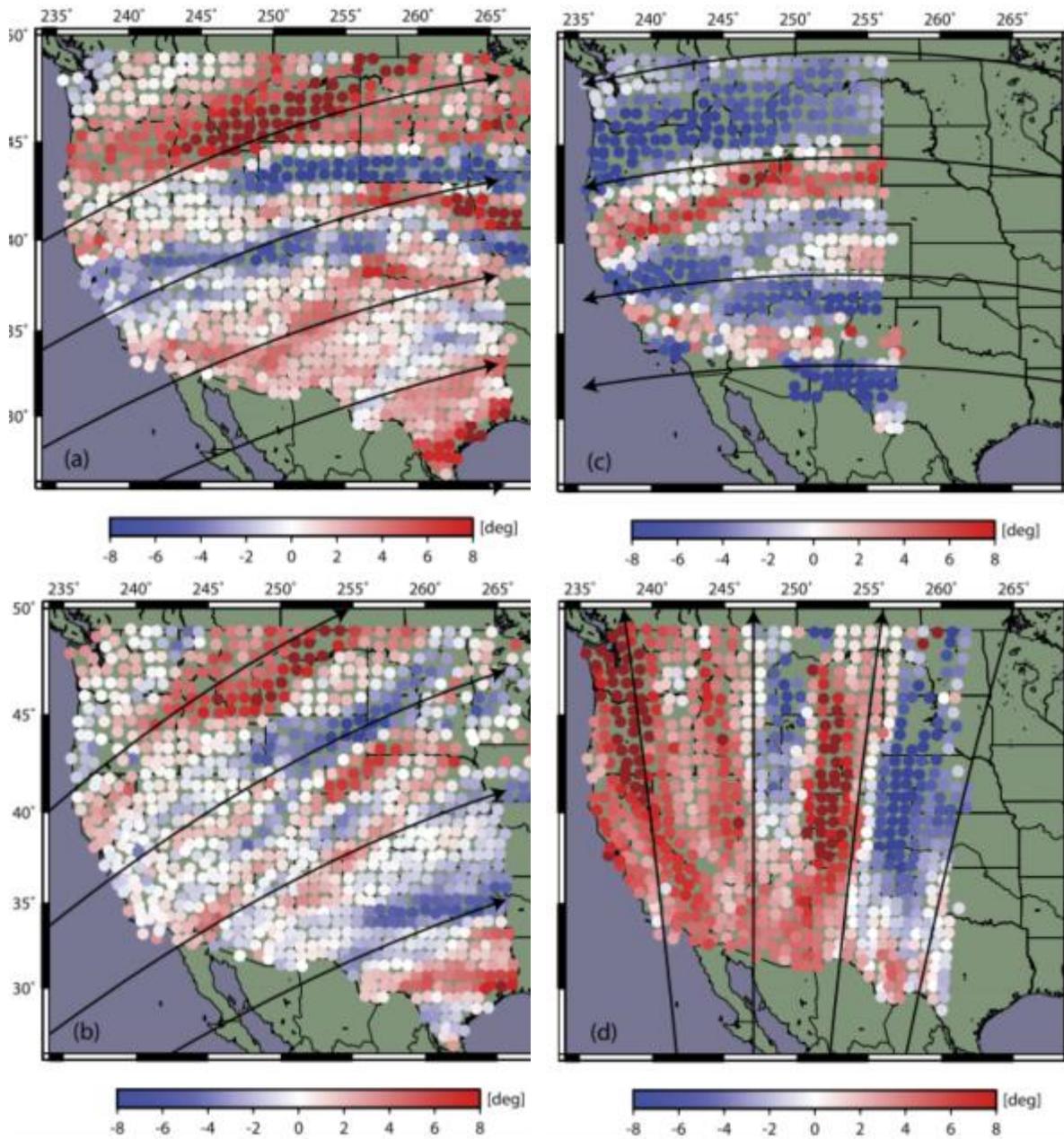


Fig. 4.20 Anomalías de ángulo de arribo estimadas para cuatro eventos distintos, a) Islas Loyalty, b) Islas Tonga, c) al norte de las Islas Ascensión, d) Isla de Pascua. Figura tomada de Foster et al. (2014).

5 Discusión y Conclusiones

En el capítulo anterior se describió detalladamente la metodología para estimar la orientación de los sismómetros de la RBA por el análisis de componentes principales y por medio de la polarización de ondas Rayleigh. Se mostraron los resultados obtenidos para la penúltima época, antes de que los ingenieros del SSN reorientaran el sensor con ayuda de un giroscopio. En este capítulo se discutirán las estimaciones obtenidas por ambos métodos, las ventajas y desventajas que estos tienen, así como los efectos que tiene una mala orientación sobre los estudios de funciones de receptor y la localización de eventos empleando una estación.

El objetivo principal propuesto de esta tesis consiste en estimar la orientación por época instrumental de los velocímetros que conforman la RBA del SSN. En general, ambos métodos utilizados arrojan estimaciones que concuerdan en la mayoría de los casos, con las mediciones realizadas in-situ por el ingeniero de campo. Para el análisis de componentes principales, 75% de las estimaciones son congruentes con la medición del giroscopio, las estimaciones obtenidas con el análisis de ondas Rayleigh en un 62%.

Los intervalos de confianza obtenidos en todas las estimaciones son muy grandes, sobre todo aquéllos del método PCA. Esto se puede atribuir principalmente a dos factores. El primero son las no idealidades del método; esto es la suposición de que las componentes del sismómetro son ortogonales, algo que en la práctica no es cierto (Wang et al., 2016). Se considera que la componente vertical del sismómetro es completamente perpendicular al suelo, algo que tampoco es cierto (Niu y Li, 2011). La no idealidad con mayor peso es la suposición de la ausencia de ruido en las componentes del sismómetro. Las no idealidades generan incertidumbre en las estimaciones, no obstante, los valores tan dispersos no pueden justificarse únicamente con las no idealidades del método. El segundo factor es la falta de control en la metodología para obtener la estimación, específicamente al seleccionar de manera automática la fase P.

Al realizar las estimaciones con el algoritmo PCA, se observó para algunas estimaciones una ambigüedad de 180° , que se pueden atribuir al diseño del algoritmo. Para reducir la ambigüedad de 180° en las estimaciones, se utilizó el azimut inverso geométrico y la polaridad de la componente vertical (Walck y Chael, 1991).

Para el método de polarización de ondas Rayleigh, también se observó una ambigüedad de 180° para algunas estimaciones, esto se puede atribuir a que la polarización de la onda Rayleigh para algunos eventos es de tipo prógrado (Tanimoto y Rivera, 2005).

5.1 Análisis de componentes principales vs polarización de ondas Rayleigh.

Debido a la incertidumbre obtenida en las estimaciones, es necesario validar los resultados obtenidos en el Capítulo 4. Gracias al trabajo del personal del Grupo de

Instrumentación y Mantenimiento del SSN se cuenta con información in-situ para todos los sismómetros de la RBA, con excepción de LVIG (Laguna Verde) y PZIG (Pozo C.U.). Con esta información se validarán los resultados obtenidos para las distintas épocas y se determinará cuál de los métodos es más preciso y robusto.

5.1.1 Comparación de la estimación por medio del análisis componentes principales con la medida del giroscopio

De fecha a fecha, el Grupo de Instrumentación del SSN llevó a cabo una campaña de reorientación de los sensores de sus estaciones de la Red de Banda Ancha. Las correcciones aplicadas en cada sismómetro son presentadas en la Tabla 5.1. Además, se muestran las estimaciones obtenidas con el análisis de componentes principales (PCA). Se excluyeron de la Tabla 5.1 las estaciones LVIG (Laguna Verde) y PZIG (Pozo C.U.) porque a la fecha de presentación de este trabajo, no se habían realizado la medición con el giroscopio. La estación TJIG (Tijuana) no fue incluida por cuestiones que se discutirán más adelante.

La Figura 5.1 muestra las estimaciones vs las mediciones realizadas con el giroscopio. La línea continua en rojo representa la recta de referencia, es el caso ideal en que la estimación es igual que la medición del giroscopio; es decir,

$$Estimación = Giroscopio. \quad (5.1)$$

Se realizó un ajuste de una recta por mínimos cuadrados

$$Estimación = a + b \cdot Giroscopio, \quad (5.2)$$

y se calcularon los intervalos de confianza del 95% para los parámetros obtenidos. Para determinar la calidad del ajuste se obtuvo el coeficiente de correlación con

$$\rho(Estimación, Giroscopio) = \frac{cov(Estimación, Giroscopio)}{\sigma_{Estimación} \sigma_{Giroscopio}}, \quad (5.3)$$

donde $\sigma_{Estimación}$ es la desviación estándar de las estimaciones y $\sigma_{Giroscopio}$ es la desviación estándar de las mediciones realizadas con el giroscopio.

La Figura 5.1 muestra las estimaciones clasificadas, los puntos negros indican las estimaciones que caen dentro del intervalo de confianza del ajuste lineal (33.3%), los puntos azules muestran las estimaciones subestimadas (33.3%) y los puntos rojos muestran las estimaciones sobrestimadas (33%).

Tabla 5.1 Comparación de las estimaciones realizadas por medio del análisis de componentes principales (PCA) con las mediciones del giroscopio.

Estación	PCA (°)	Giroscopio (°)	Diferencias (°)	Estación	PCA (°)	Giroscopio (°)	Diferencias (°)
AAIG	7.9	6.8	1.1	GTIG	7.1	3	4.1
ANIG	1.4	3.5	-2.1	HLIG	9.2	11.3	-2.1
ARIG	11.8	15.8	-4	HPIG	-1.2	-3.3	2.1
CAIG	13.4	15.3	-1.9	HSIG	2	1.7	0.3
CCIG	4.7	3.4	1.3	HUIG	-5.6	9.7	-15.2
CGIG	4	4.9	-0.9	IGIG	4.7	5.9	-1.2
CJIG	9.6	13.7	-4.1	JRQG	-5.4	-4.5	-0.9
CMIG	6.5	7.8	-1.3	LNIG	5.2	4.4	0.8
CRIG	6.4	7.7	-1.3	LPIG	1	-0.4	1.4
CSIG	-8.8	-11.1	2.3	MAIG	13	16.1	-3.1
CUIG	10.9	13.1	-2.2	MBIG	-3.9	0	-3.9
DAIG	1.4	3.8	-2.4	MCIG	14.7	9.3	5.4
DHIG	13.7	17.3	-3.6	MEIG	11.4	13.1	-1.7
FTIG	3.1	5.5	-2.4	MMIG	7.8	12.8	-5

5.1.2 Comparación de la estimación por medio de la polarización de ondas Rayleigh con la medida con el giroscopio

Se muestran en la Tabla 5.2 las dos estimaciones realizadas con el algoritmo CS, POR 1 utiliza la Ecuación 4.1 y POR 2, la Ecuación 4.2, así como las mediciones del giroscopio. La Tabla 5.3 muestra las diferencias entre las estimaciones y el giroscopio. Las figuras 5.2 y 5.3 comparan las estimaciones obtenidas con el algoritmo CS con las mediciones realizadas utilizando el giroscopio.

Para poder comparar ambos métodos, se realizó un ajuste de una recta por medio de mínimos cuadrados y se obtuvo el coeficiente de correlación.

Tabla 5.1 continuación Comparación de las estimaciones realizadas por medio del análisis de componentes principales (PCA) con las mediciones del giroscopio.

Estación	PCA (°)	Giroscopio (°)	Diferencias (°)	Estación	PCA (°)	Giroscopio (°)	Diferencias (°)
MNIG	46.2	38.4	7.8	SPIG	-5.4	-0.2	-5.2
MOIG	19.8	17.1	2.7	SSIG	7.7	8.3	-0.6
MYIG	-2.1	2	-4.1	TGIG	-5.1	1.7	-6.8
NZIG	6.9	5.8	1.1	THIG	-10.2	-1.4	-8.8
OXIG	9.3	10.3	-1	TLIG	3.7	9.4	-5.7
PCIG	-10	-1.5	-8.5	TOIG	4.4	10.6	-6.2
PDIG	2.6	2.3	0.3	TPIG	8.4	8.2	0.2
PEIG	9.9	9.6	0.3	TSIG	-3.1	-1.7	-1.4
PLIG	9.5	10.4	-0.9	TUIG	2.4	0	2.4
PNIG	7	16.9	-9.9	TXIG	13.4	7.5	5.9
PPIG	21.4	13.5	7.9	YAIG	7.4	5.6	1.8
RPIG	-6.3	6.7	-13	YOIG	16.3	16.8	-0.5
SCIG	-0.6	0.8	-1.4	ZAIG	11.8	14.5	-2.7
SRIG	20.4	21.6	-1.2	ZIIG	9.5	9.8	-0.3

Las figuras 5.2 y 5.3 muestran las estimaciones clasificadas, los puntos negros muestran las estimaciones que caen dentro del intervalo de confianza del ajuste lineal (42.9% y 44.6%), los puntos azules muestran las estimaciones subestimadas (17.9 % y 23.2 %) y los puntos rojos muestran las estimaciones sobrestimadas (39.3% y 32.1%).

5.1.3 Comparación entre los métodos de estimación

Para poder determinar de manera cuantitativa cuál método es más robusto y preciso, se analizan las figuras 5.4 y 5.5, así como la Tabla 5.4 que contiene los parámetros obtenidos del ajuste realizado entre las estimaciones obtenidas y la medición con el giroscopio.

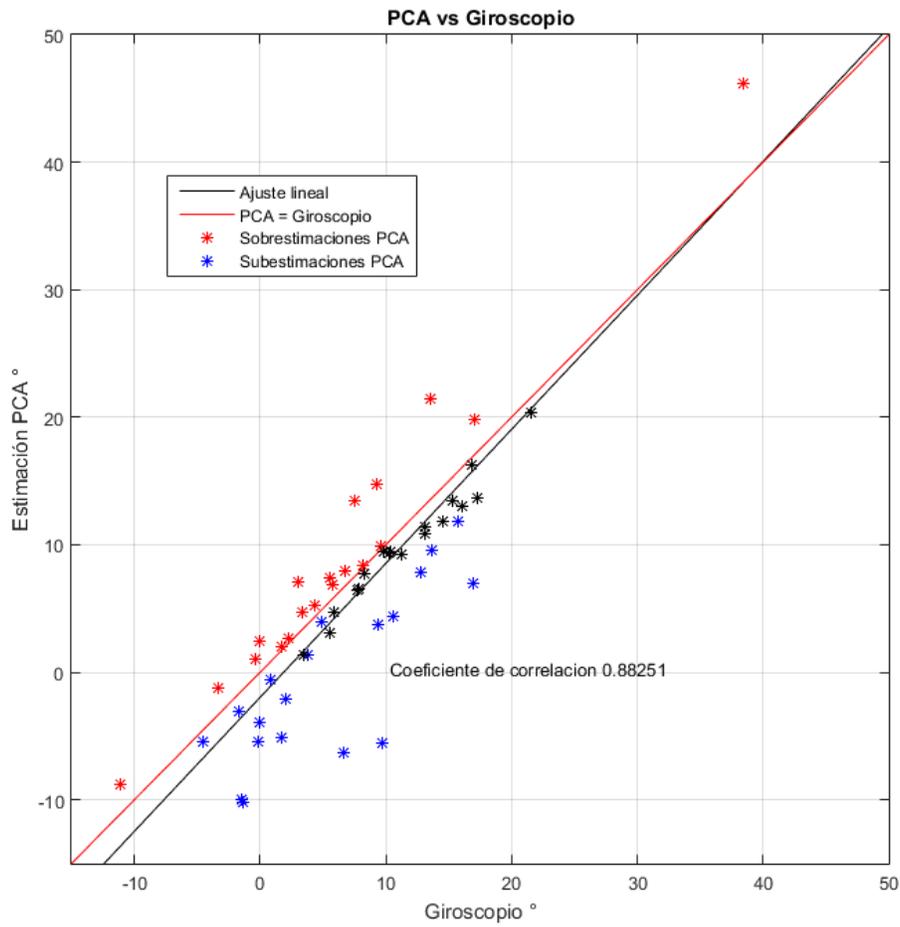


Fig. 5.1 Comparación entre las estimaciones realizadas con el análisis de componentes principales (PCA) vs la medida con el giroscopio. La línea roja muestra el ajuste de lineal, la ordenada al origen tiene un valor de $a = -1.967$ con intervalos de confianza del 95 % $(-3.631, -0.3033)$, con pendiente $b = 1.051$ con intervalos de confianza del 95 % $(0.8979, 1.203)$. El coeficiente de correlación tiene un valor de $\rho = 0.88251$, con intervalos de confianza del 95 % $(0.8071, 0.9305)$.

Tabla 5.2 Comparación de las estimaciones realizadas por medio de la polarización de ondas Rayleigh (POR 1 y POR 2) con las mediciones del giroscopio.

Estación	POR 1 (°)	POR 2 (°)	Giroscopio (°)	Estación	POR 1 (°)	POR 2 (°)	Giroscopio (°)
AAIG	7.4	7.4	6.8	HLIG	21.5	21.8	11.3
ANIG	-2.3	-2.2	3.5	HPIG	2.6	2.4	-3.3
ARIG	20.1	21.1	15.8	HSIG	2	2.1	1.7
CAIG	17.9	18.5	15.3	HUIG	13.8	13.1	9.7
CCIG	3.5	4.7	3.4	IGIG	8	7	5.9
CGIG	6	6.5	4.9	JRQG	-3.9	-3	-4.5
CJIG	6.5	7	13.7	LNIG	4.7	4	4.4
CMIG	6.7	6.8	7.8	LPIG	-3.3	-3.9	-0.4
CRIG	13.8	14.4	7.7	MAIG	21.9	21.7	16.1
CSIG	-4.9	-4.3	-11.1	MBIG	1.8	-2.4	0
CUIG	17.6	17.5	13.1	MCIG	12.4	14.4	9.3
DAIG	8.2	11	3.8	MEIG	21	23	13.1
DHIG	14.1	14.2	17.3	MMIG	9.3	9.8	12.8
FTIG	16.7	17.1	5.5	MNIG	28.7	27.9	38.4
GTIG	4.4	4.5	3	MOIG	19.6	21.7	17.1

Tabla 5.2 continuación Comparación de las estimaciones realizadas por medio de la polarización de ondas Rayleigh (POR I y POR II) con las mediciones del giroscopio.

Estación	POR 1 (°)	POR 2 (°)	Giroscopio (°)	Estación	POR 1 (°)	POR 2 (°)	Giroscopio (°)
MYIG	5.6	5.3	2	TGIG	2.2	2.9	1.7
NZIG	5.4	5.3	5.8	THIG	7.6	7.2	-1.4
OXIG	17.3	16.9	10.3	TJIG	-78.7	-79.2	-90*
PCIG	5.9	6	-1.5	TLIG	16.3	16.7	9.4
PDIG	6.1	7.3	2.3	TOIG	16.7	17.6	10.6
PEIG	14.1	14.5	9.6	TPIG	19.6	21.9	8.2
PLIG	20.3	20.7	10.4	TSIG	-0.9	-3.1	-1.7
PNIG	20	18.7	16.9	TUIG	-1.6	-2	0
PPIG	24	23.3	13.5	TXIG	20	16.8	7.5
RPIG	10.5	10.4	6.7	YAIG	21.2	22.4	5.6
SCIG	-3.9	-5.6	0.8	YOIG	25	25.5	16.8
SRIG	26	26.2	21.6	ZAIG	16.7	18.9	14.5
SPIG	2.1	2.4	-0.2	ZIIG	13.7	14	9.8
SSIG	12.5	12.7	8.3				

* Para la estación TJIG se encontraron los canales de las componentes horizontales invertidas, en estricto sentido no se tiene la corrección con el giroscopio (Figura 5.7).

Tabla 5.3 Diferencia entre las estimaciones realizadas por medio de la polarización de ondas Rayleigh (POR 1 y POR 2) y las mediciones del giroscopio.

Estación	Diferencia POR 1 (°)	Diferencia POR 2 (°)	Estación	Diferencia POR 1 (°)	Diferencia POR 2 (°)
AAIG	0.6	0.6	HLIG	10.2	10.5
ANIG	-5.8	-5.7	HPIG	5.9	5.7
ARIG	4.3	5.3	HSIG	0.3	0.4
CAIG	2.6	3.2	HUIG	4.1	3.4
CCIG	0.1	1.3	IGIG	2.1	1.1
CGIG	1.1	1.6	JRQG	0.6	1.5
CJIG	-7.2	-6.7	LNIG	0.3	-0.4
CMIG	-1.1	-1	LPIG	-2.9	-3.5
CRIG	6.1	6.7	MAIG	5.8	5.6
CSIG	6.2	6.8	MBIG	1.8	-2.4
CUIG	4.5	4.4	MCIG	3.1	5.1
DAIG	4.4	7.2	MEIG	7.9	9.9
DHIG	-3.2	-3.1	MMIG	-3.5	-3
FTIG	11.2	11.6	MNIG	-9.7	-10.5
GTIG	1.4	1.5	MOIG	2.5	4.6

Tabla 5.3 continuación Diferencia entre las estimaciones realizadas por medio de la polarización de ondas Rayleigh (POR 1 y POR 2) y las mediciones del giroscopio.

Estación	Diferencia POR 1 (°)	Diferencia POR 2 (°)	Estación	Diferencia POR 1 (°)	Diferencia POR 2 (°)
MYIG	3.6	3.3	TGIG	0.5	1.2
NZIG	-0.4	-0.5	THIG	9	8.6
OXIG	7	6.6	TJIG	11.3	10.8
PCIG	7.4	7.5	TLIG	6.9	7.3
PDIG	3.8	5	TOIG	6.1	7
PEIG	4.5	4.9	TPIG	11.4	13.7
PLIG	9.9	10.3	TSIG	0.8	-1.4
PNIG	3.1	1.8	TUIG	-1.6	-2
PPIG	10.5	9.8	TXIG	12.5	9.3
RPIG	3.8	3.7	YAIG	15.6	16.8
SCIG	-4.7	-6.4	YOIG	8.2	8.7
SRIG	4.4	4.6	ZAIG	2.2	4.4
SPIG	2.3	2.6	ZIIG	3.9	4.2
SSIG	4.2	4.4			

* Para la estación TJIG se encontraron los canales de las componentes horizontales invertidas, en estricto sentido no se tiene la corrección con el giroscopio (Figura 5.7).

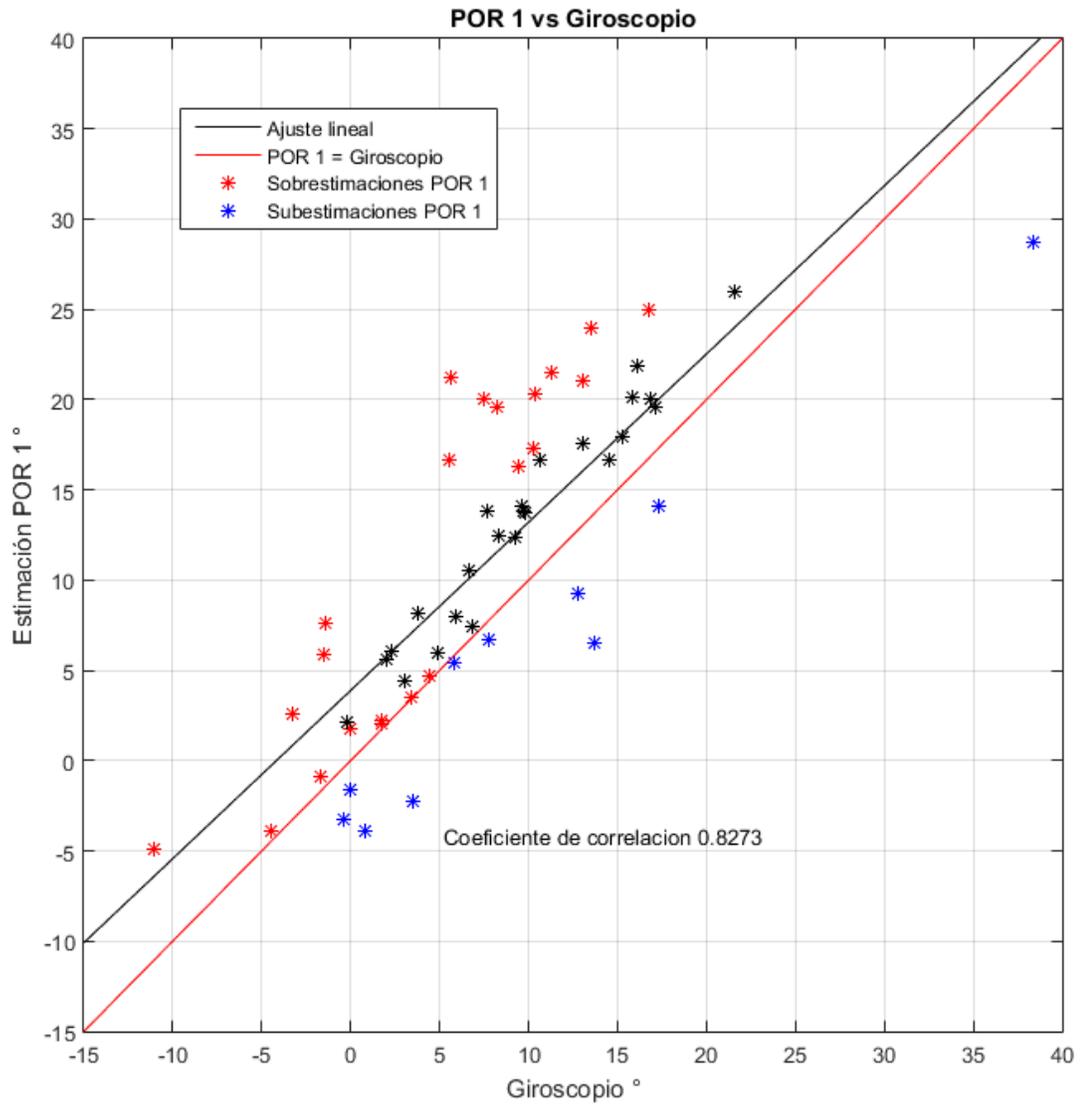


Fig. 5.2 Comparación entre las estimaciones realizadas (POR 1) vs medidas con giroscopio. La línea roja muestra el ajuste de lineal, la ordenada al origen tiene un valor de $a = 3.891$ con intervalos de confianza del 95 % (2.01, 5.771), con pendiente $b = 0.9318$ con intervalos de confianza del 95 % (0.7592, 1.104). El coeficiente de correlación tiene un valor de $\rho = 0.8273$, con intervalos de confianza del 95 % (0.7213, 0.8954).

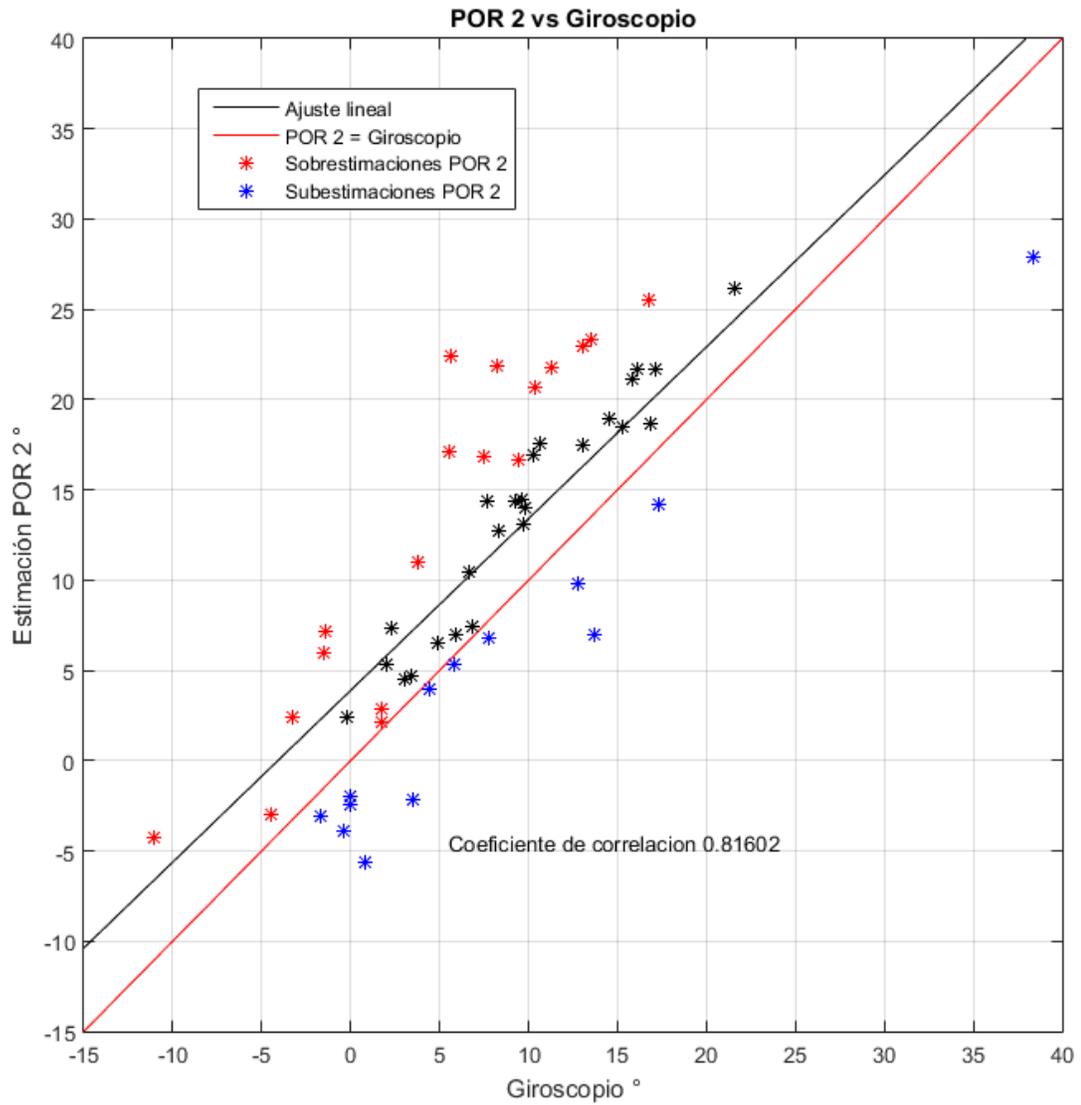


Fig. 5.3 Comparación entre las estimaciones realizadas (POR 2) vs medida con el giroscopio. La línea roja muestra el ajuste de lineal, la ordenada al origen tiene un valor de $a = 3.894$ con intervalos de confianza del 95 % (1.891, 5.896), con pendiente $b = 0.9513$ con intervalos de confianza del 95 % (0.7674, 1.135). El coeficiente de correlación tiene un valor de $\rho = 0.81602$, con intervalos de confianza del 95 % (0.7042, 0.8883).

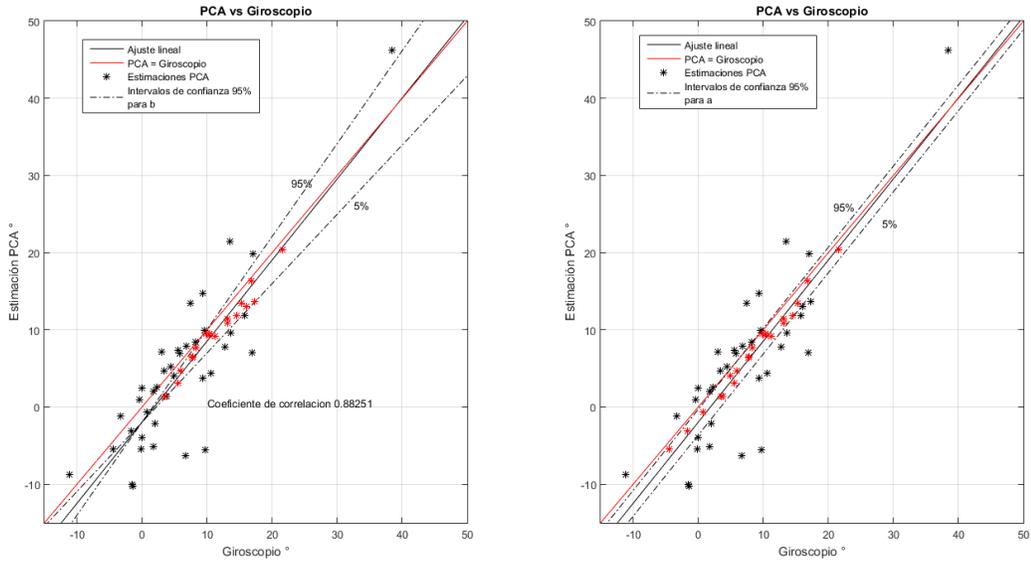


Fig. 5.4 Se muestran el ajuste lineal entre la estimación con el método PCA y las mediciones con giroscopio.

Tabla 5.4 Parámetros obtenidos del ajuste lineal entre las estimaciones y las mediciones del giroscopio. Entre paréntesis se muestran los intervalos de confianza del 95% para los distintos parámetros obtenidos.

Método	Pendiente (b)	Ordenada al origen (a)	Coefficiente de correlación (ρ)
PCA	1.051 (0.8979, 1.203)	-1.967 (-3.631, -.3033)	0.88251
POR 1 (Algoritmo CS)	0.9318 (0.7592, 1.104)	3.891 (2.01, 5.771)	0.8273
POR 2 (Algoritmo CS)	0.9513 (0.7674, 1.135)	3.894 (1.891, 5.896)	0.81602

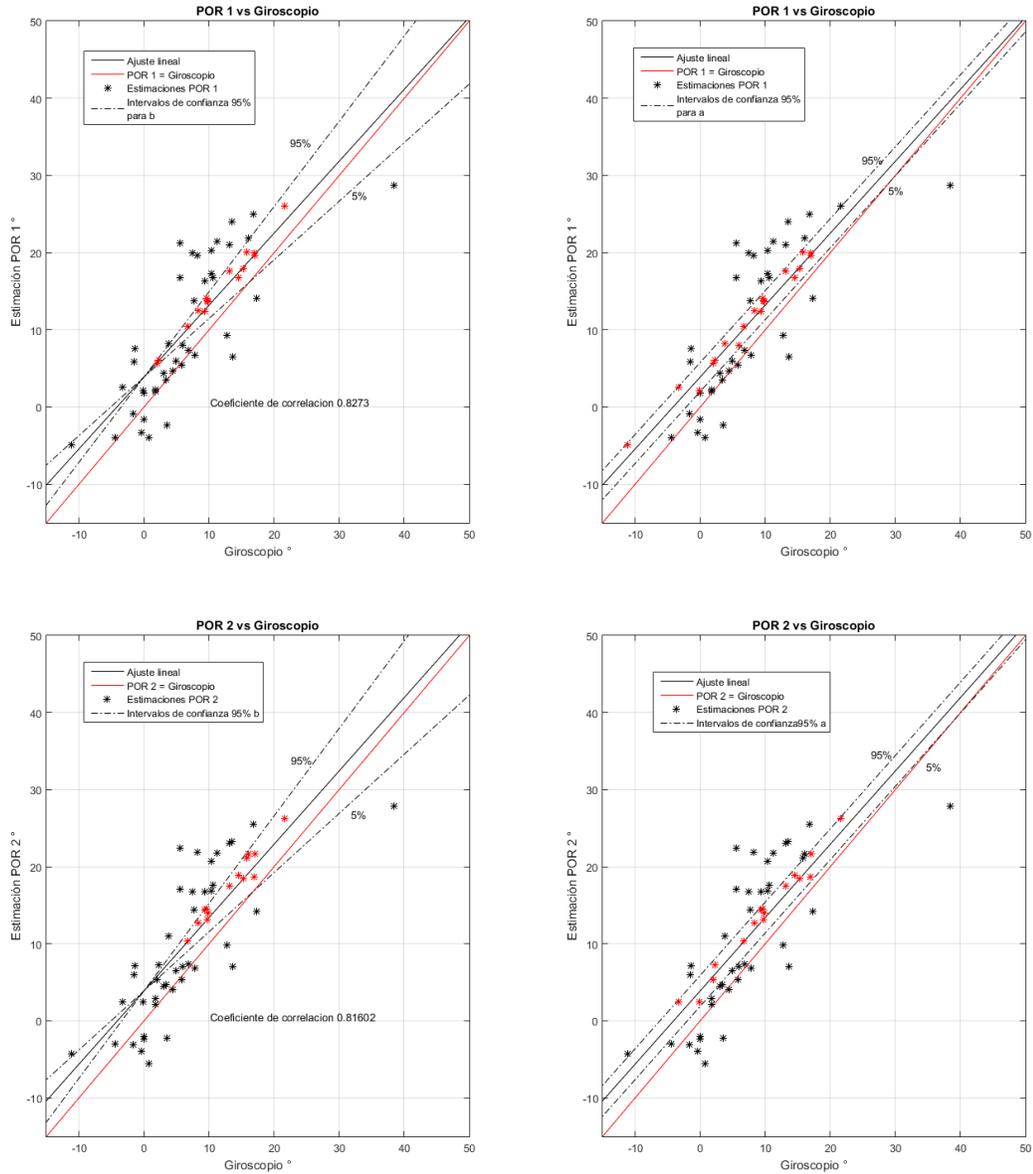


Fig. 5.5 Se muestran el ajuste lineal entre las estimaciones con el algoritmos CS (POR 1 y POR 2) y las mediciones con giroscopio.

Se realizó una prueba de hipótesis para comprobar qué modelo representa mejor las estimaciones realizadas. Se tienen dos hipótesis nulas, una por cada parámetro del ajuste lineal. Para el caso de la pendiente se tiene

$$H_0 : b = 1 ,$$

y la hipótesis alternativa

$$H_1 : b \neq 1 .$$

Se utiliza el siguiente estadístico para comprobar la prueba de hipótesis de la pendiente (Saber y Lee, 2003)

$$t_0 = \frac{b-1}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Giroscopio}_i - \text{Estimación}_i)^2}{n-2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Giroscopio}_i)^2 - \frac{[\sum_{i=1}^n (\text{Giroscopio}_i)]^2}{n}}{n}}}} \quad (5.4)$$

Para la ordenada al origen

$$H_0 : a = 0,$$

y la hipótesis alternativa

$$H_1 : a \neq ,0.$$

Para el caso de la ordenada al origen se utiliza el siguiente estadístico (Saber y Lee, 2003)

$$t_0 = \frac{a-0}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Giroscopio}_i - \text{Estimación}_i)^2}{n-2} \left(\frac{1}{n} + \frac{\overline{\text{Giroscopio}}^2}{\sum_{i=1}^n (\text{Giroscopio}_i)^2 - \frac{[\sum_{i=1}^n (\text{Giroscopio}_i)]^2}{n}} \right)}} \quad (5.5)$$

La hipótesis se rechaza si

$$|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} , \quad (5.6)$$

donde α es el nivel de significancia del 5%, la Tabla 5.5 muestra los resultados obtenidos para ambas pruebas de hipótesis.

Tabla 5.5 Resultados de las pruebas de hipótesis.

Estimación	t_0 Parámetro b	t_0 Parámetro a	$t_{\frac{\alpha}{2}, n-2}$
PCA	0.6647	2.3703	2.0049
POR 1	0.7915	4.1483	2.0049
POR 2	0.5316	3.8983	2.0049

Con los resultados mostrados en la Tabla 5.5 podemos confirmar que los datos sí se pueden explicar con una recta de pendiente 1, no obstante, la prueba de hipótesis para la ordenada al origen, fue rechazada. Esto significa que las estimaciones no siguen el modelo de la Ecuación 5.1. El modelo de regresión significativo para las estimaciones está dado por la Ecuación 5.2 con $b = 1$.

En la Figura 5.1, se observa que las estimaciones obtenidas con el método PCA, tienen una correlación alta con las mediciones de campo, lo que concuerda con el valor del coeficiente de correlación obtenido con la Ecuación 5.3.

En las figuras 5.2 y 5.3, se observa una buena correlación entre las mediciones de campo y las estimaciones obtenidas con el algoritmo CS (POR), no obstante, ambos coeficientes de correlación tienen un valor menor que el de las estimaciones obtenidas con el método PCA.

La Figura 5.6 muestra el mapa de los resultados subestimados y sobreestimados para las dos metodologías. Se observa una clara dependencia geográfica para las sobreestimaciones obtenidas con el método de polarización de ondas Rayleigh (algoritmo CS). Esta dependencia geográfica se podría atribuir a la tectónica del país y al intervalo de frecuencias con el que se trabajó. Se propone para un futuro analizar con detalle este planteamiento, con el objetivo de aceptar o descartar esta hipótesis, este análisis consistiría en obtener las estimaciones de orientación en esta zona para distintas bandas de frecuencia y no sólo en la que se propuso para este trabajo [0.02 a 0.04] Hz.

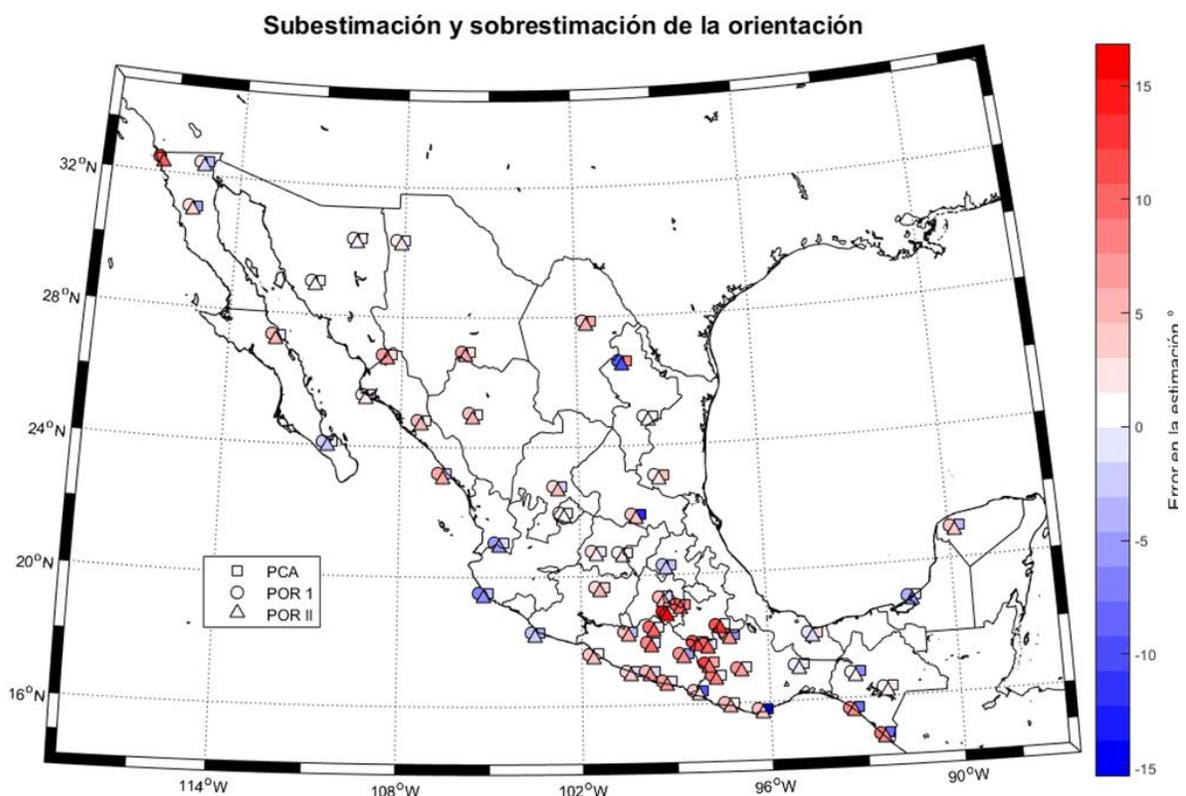


Fig. 5.6 Se muestran las estaciones que fueron sobreestimadas(rojo) y subestimadas(azul).

El método POR (algoritmo CS) tiene la ventaja de que puede estimar de manera aceptable la orientación del sismómetro con eventos de menor magnitud, de esta forma se puede obtener una estimación buena sin tener que esperar eventos de mayor magnitud como en el caso de PCA.

Esta ventaja del método POR permitió encontrar uno de los resultados más importantes de este trabajo. Se identificó que, para la época del 9 de octubre del 2014 al 23 de octubre del 2015, los canales horizontales del sismómetro en la estación TJIG (Tijuana) estaban invertidos; es decir, para esa época se tuvo un error de orientación de casi -90° .

5.2 Caso Tijuana, Baja California

Se decidió presentar el caso del sismómetro de Tijuana por aparte, ya que el resultado de la estimación ayudó a confirmar el correcto funcionamiento de los programas desarrollados para este trabajo. La estación TJIG comenzó a aportar información a la RBA a partir del 30 de octubre del 2010. La primera época para esta estación se acotó desde esta fecha y hasta el 9 de octubre del 2014. En ella se contó con un digitalizador marca Quanterra modelo Q680 y un sensor de velocidad STS-2. La Figura 5.7 muestra las rosetas obtenidas para la primera época de análisis. De manera cuantitativa, podemos afirmar que la estación estuvo bien orientada en esta época.

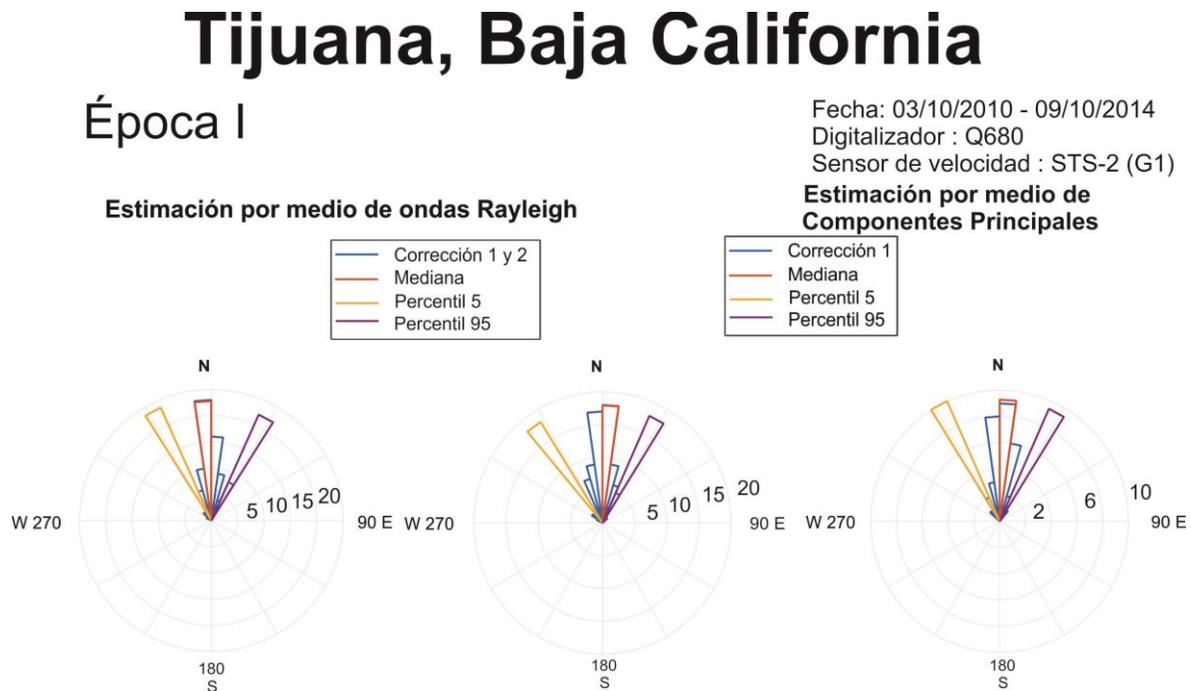


Fig. 5.7 Estimaciones realizadas para la estación TJIG época 1. Los valores del error de orientación para esta época son los siguientes, $POR\ 1 = -0.3^\circ$, $POR\ 2 = 0.1^\circ$ y $PCA = 1.6^\circ$.

El 9 de octubre del 2014, la estación TJIG tuvo cambios tanto en el digitalizador, como en el sensor de velocidad. Se sustituyó el digitalizador por un modelo Quanterra Q330S+ y el sensor de velocidad fue remplazado por un Trillium 240. Después de esta fecha no se han realizado cambios ni en el digitalizador ni en el sensor de velocidad. Sin embargo, se tuvo que dividir la última época, debido a que, del 9 de octubre del 2014 al 23 de octubre del 2015, los canales horizontales estuvieron invertidos. La Figura 5.8 muestra la estimación obtenida, para esta época.

Tijuana, Baja California

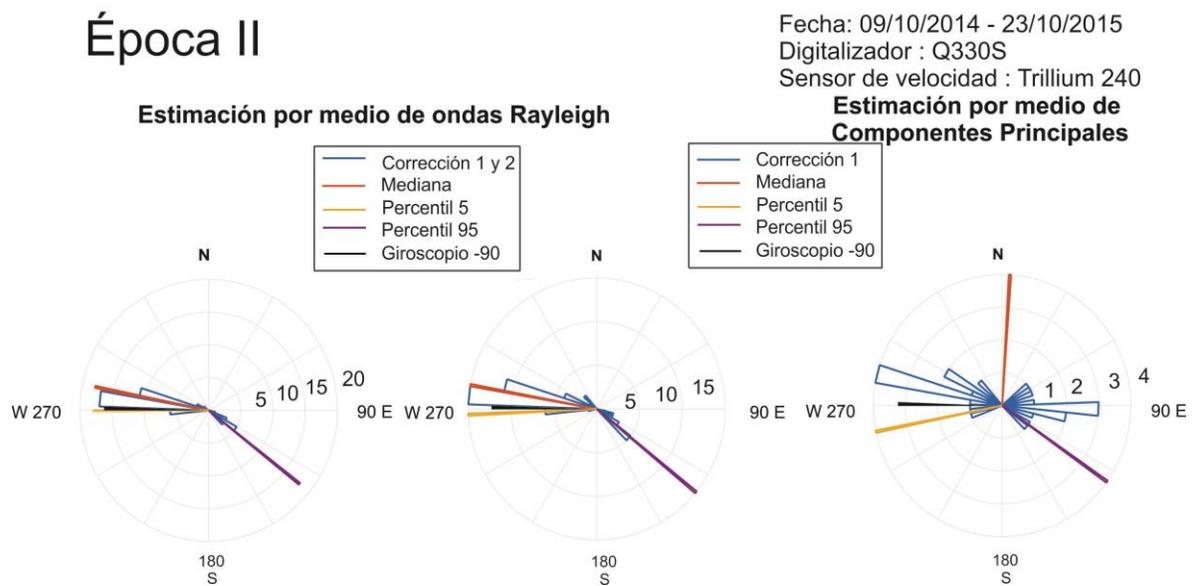


Fig. 5.8 Estimaciones realizadas para la estación TJIG época II. Los valores del error de orientación para esta época son los siguientes, $POR\ 1 = -78.7^\circ$, $POR\ 2 = -79.2^\circ$ y $PCA = 3.2^\circ$.

De la Figura 5.8 se observa la ambigüedad de 180° que existe en los algoritmos implementados para este trabajo; no obstante, podemos afirmar que ambos métodos identifican que los canales horizontales fueron conectados de manera errónea para esa época. El canal de la componente Este del sismómetro se encontraba conectado en el conector Norte del digitalizador y viceversa.

Este resultado fue corroborado por el jefe del Grupo de Análisis e Interpretación de Datos del SSN, el Dr. Víctor Hugo Espínola Castro quien revisó la polaridad de las tres componentes de velocidad para eventos registrados en TJIG del 9 de octubre de 2014 al 26 de octubre de 2015.

El error fue por causas humanas, y se debió a un cambio en la instrumentación de la estación TJIG. El día 9 de octubre de 2014 la estación TJIG cambió de digitalizador Q680 por un Q330 y su sensor de velocidad STS-2 por un Trillium 240. A partir del 26 de octubre de 2015 los sensores están debidamente orientados

A continuación se discuten los efectos de una mala orientación de los sensores de movimiento en el cálculo de funciones de receptor (RF) así como en la localización de eventos con una sola estación.

5.3 Efectos de una mala orientación en estudios sismológicos

Al inicio del Capítulo 4 se mencionó lo importante que es tener los sismómetros correctamente orientados, a continuación se ejemplifica el efecto que tiene una estación mal orientada sobre dos ejemplos, uno es el cálculo de funciones de receptor y otro es la localización de eventos realizada con una sola estación.

5.3.1 Efectos de una mala orientación en funciones de receptor

Uno de los estudios más utilizados en la sismología moderna, son las funciones de receptor (FR). Una función de receptor se define como una serie de tiempo calculada a partir de los registros de las tres componentes de un sismograma dado un evento sísmico. La FR muestra la respuesta relativa de la estructura por debajo de la estación de registro (Ammon,1991).

Se calcularon dos funciones de receptor de onda P (FRP) para la estación MNIG (Monterrey), una con las formas de onda originales, cuyo error en la orientación fue de 38.1° y otra rotando las formas de onda rotadas -38.1°, para compensar el error de orientación. Se utilizó la misma metodología implementada por Rodríguez (2013) para calcular las funciones de receptor de onda P, a su vez basada en Ligorria y Ammon (1999). La Figura 5.9 muestra ambas funciones de receptor calculadas.

Con el objetivo de delimitar intervalos de error de orientación aceptables para el cálculo de funciones de receptor, se rotaron las formas de onda corregidas por orientación cada 3°, en un intervalo de -45° a 45°, se calcularon funciones de receptor y se obtuvo el error absoluto normalizado entre los datos corregidos por orientación y los datos rotados.

$$Error = \frac{\sum |RF_{corregida} - RF_{rotada}|}{\sum |RF_{corregida}|}, \quad (5.7)$$

y la norma L2

$$||Error||_2 = \sqrt{\sum (RF_{corregida} - RF_{rotada})^2}, \quad (5.8)$$

entre la función de receptor corregida y las rotadas.

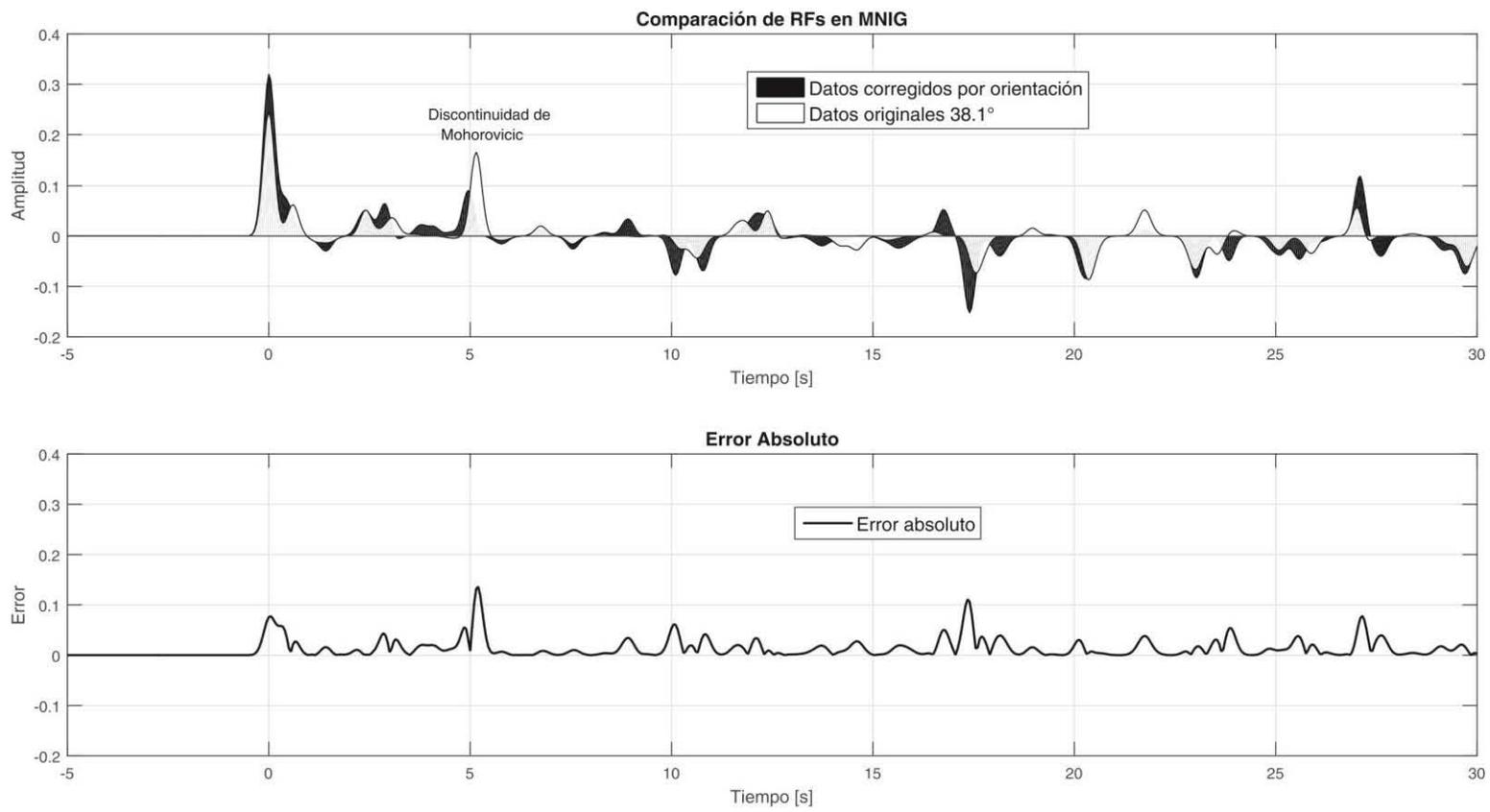


Fig. 5.9 Funciones de receptor (RF) calculadas para la estación MNIG.

La Figura 5.10 compara los datos corregidos por orientación con los datos rotados en -3° y 3° . Las figuras 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14 comparan los datos corregidos con los datos rotados en -6° y 6° , -9° y 9° , -21° y 21° y para -45° y 45° , respectivamente.

El cálculo del error se muestra en la Figura 5.15. Se muestra la variación del error en función de la corrección. Se observa que, al aumentar el ángulo de rotación, el error aumenta.

La Figura 5.16 muestra las FRs calculadas. Se observa que, para ángulos negativos, el tiempo de arribo del pulso asociado con la discontinuidad de Mohorovičić se pierde al aumentar el ángulo de rotación.

En las figuras 5.10 a 5.14 se comparan las funciones de receptor calculadas con los datos corregidos por orientación (38.1°) y las funciones de receptor calculadas con los registros rotados. En la Figura 5.10 observamos que para errores de orientación entre -3° y 3° , la función de receptor no difiere en forma y amplitud con la función de receptor corregida.

En la Figura 5.11 se aprecia una ligera distorsión en la función de receptor para 6° , no obstante, para -6° la distorsión es mayor. Esto se aprecia en la amplitud del pulso asociado con la discontinuidad de Mohorovic, aproximadamente en 5 s.

En las figuras 5.12 a 5.14, las distorsiones en la forma y amplitud de la función de receptor son más evidentes.

Utilizando la información de las figuras 5.10 a 5.14 y complementando con el cálculo de la norma L2 y el error normalizado de la Figura 5.15, podemos considerar aceptables las funciones de receptor calculadas en estaciones cuyo error se encuentra entre -6° y 6° . Fuera de estos límites se recomienda corregir los datos por orientación; o bien, rotar las componentes por medio de otros métodos y no de acuerdo con el azimut inverso del sismo.

5.3.2 Efectos de una mala orientación en la localización de eventos con una estación

Usualmente, el hipocentro de un evento se determina usando las fases sísmicas observadas en distintas estaciones; no obstante, a veces no se cuenta con más de una estación, por lo que es necesario localizar la fuente sísmica utilizando sólo la información de sus tres componentes. Este método requiere que las componentes horizontales del sensor estén bien orientadas.

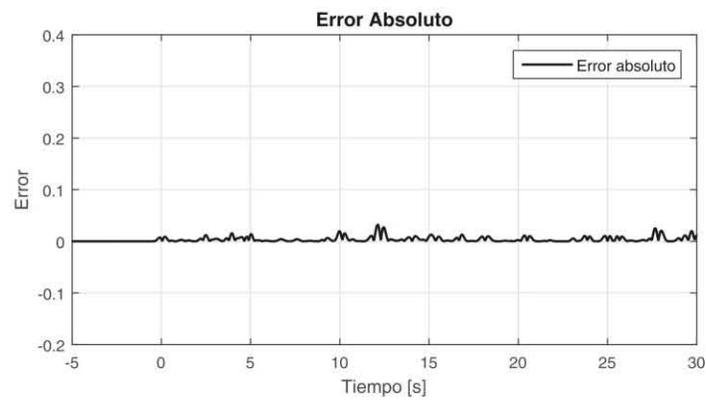
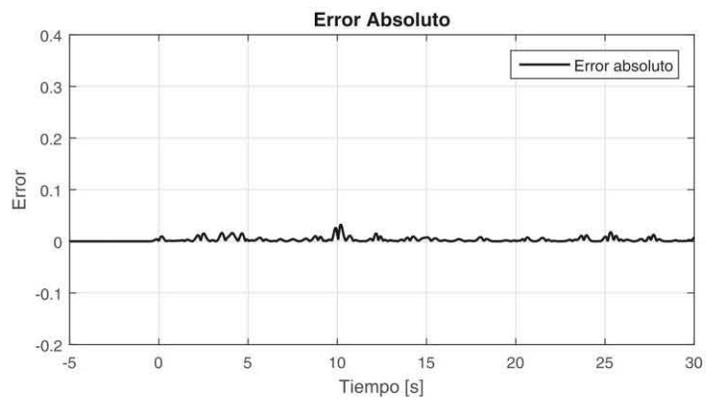
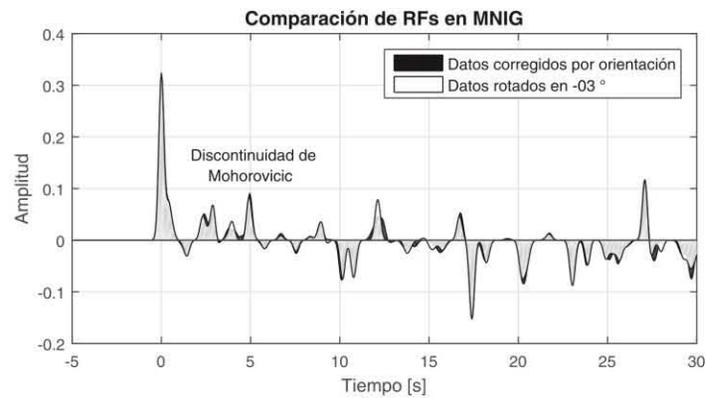
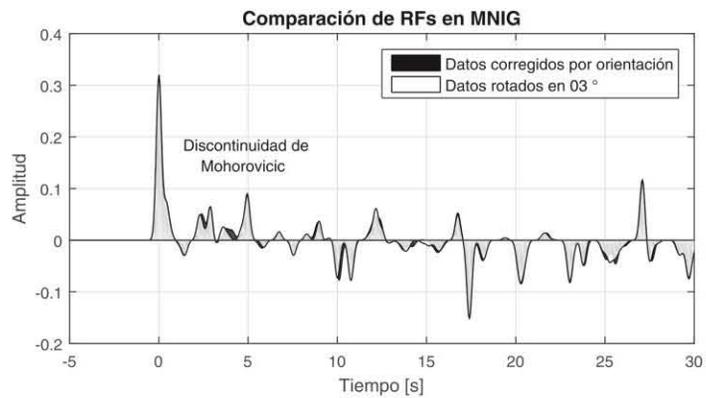


Fig. 5.10 Funciones de receptor (RF) calculadas para la estación MNIG. Se rotaron los datos originales en -3° y 3° .

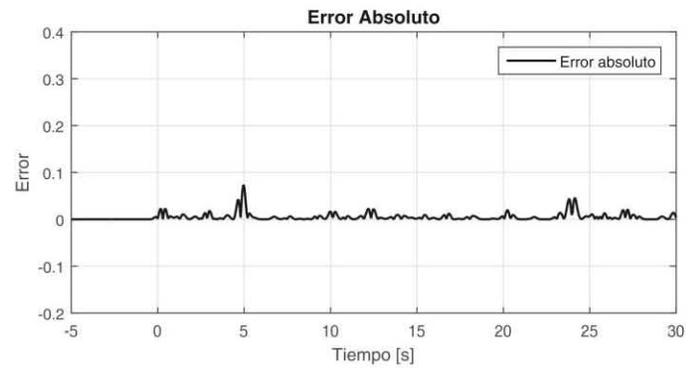
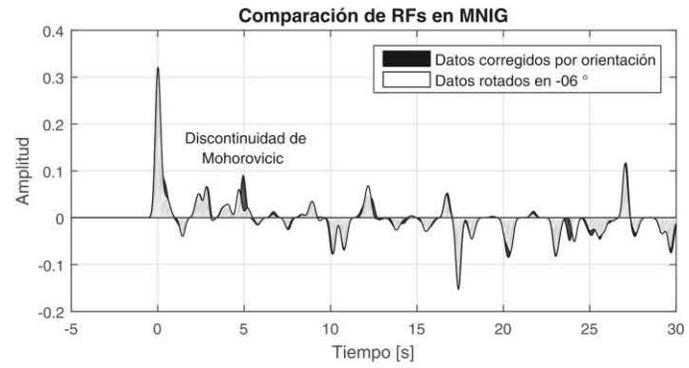
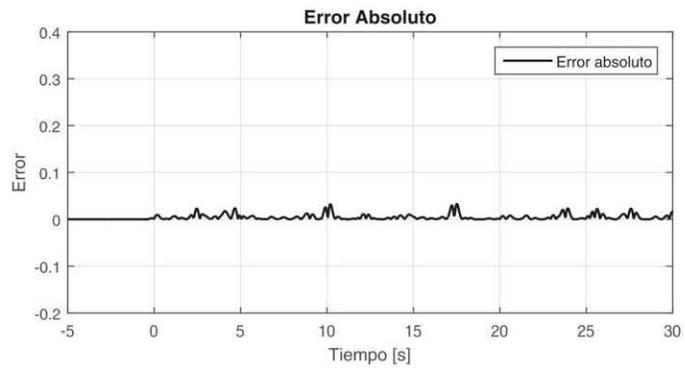
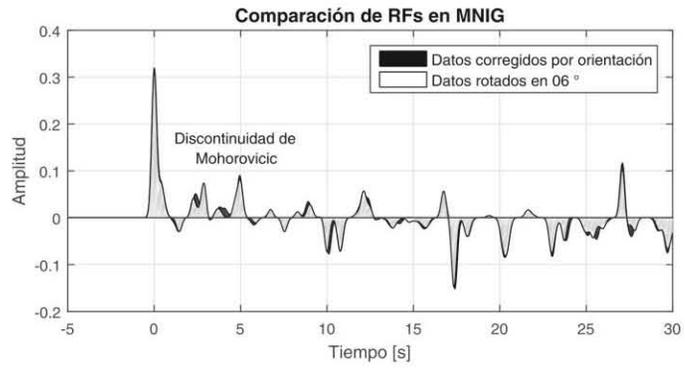


Fig. 5.11 Funciones de receptor (RF) calculadas para la estación MNIG. Se rotaron los datos originales en -6° y 6° .

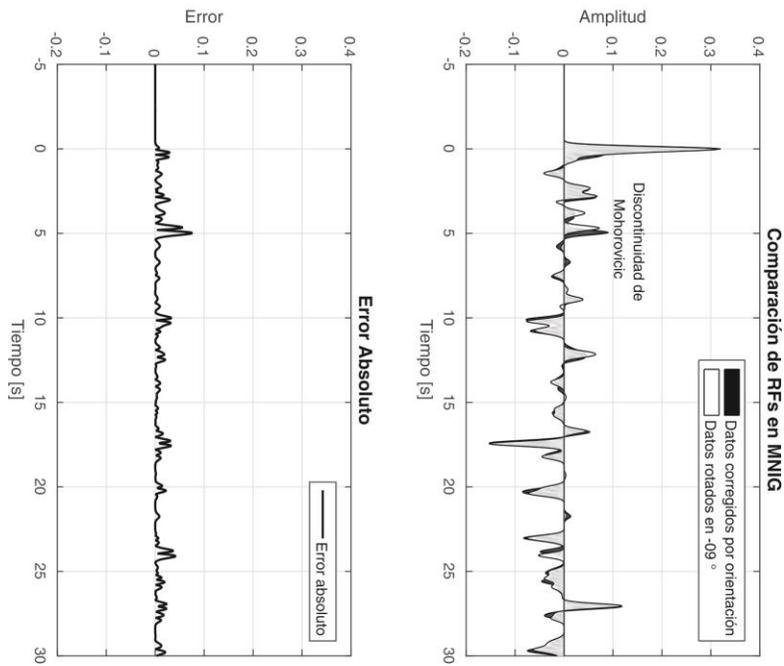
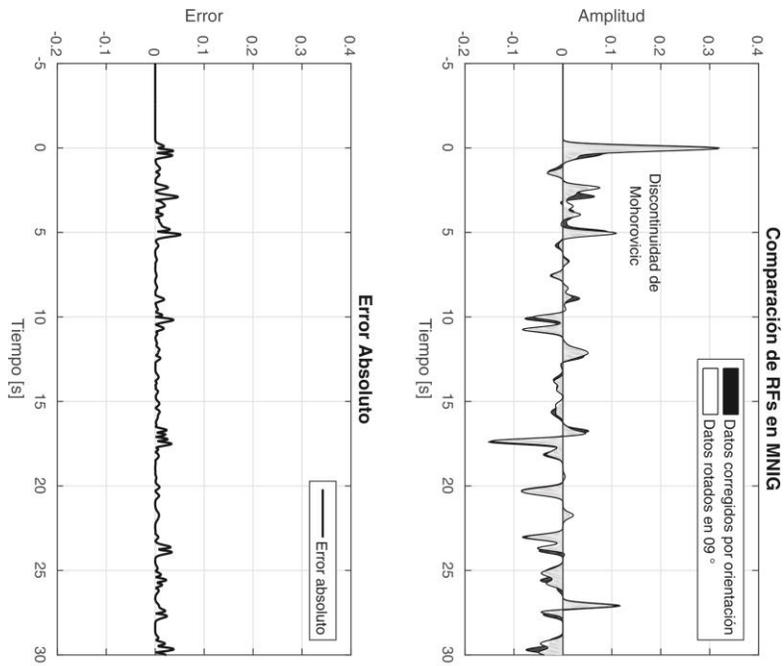


Fig. 5.12 Funciones de receptor (RF) calculadas para la estación MNIG. Se rotaron los datos originales en -9° y 9° .

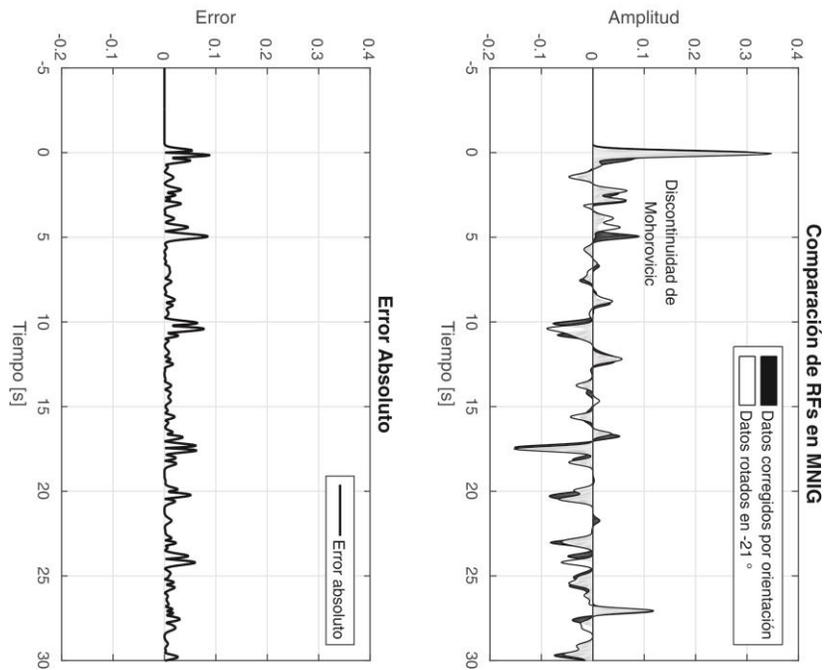
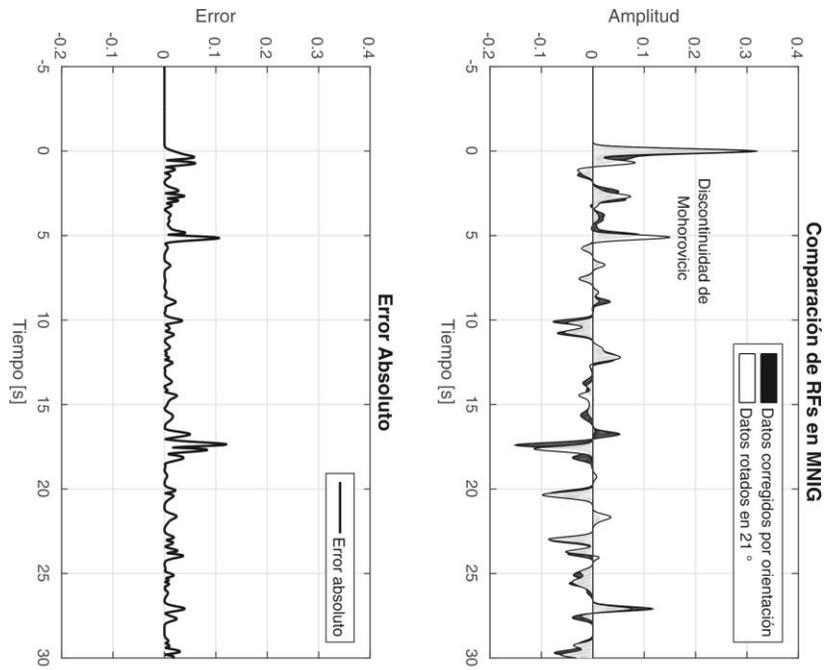


Fig. 5.13 Funciones de receptor (RF) calculadas para la estación MNIG. Se rotaron los datos originales en -21° y 21° .

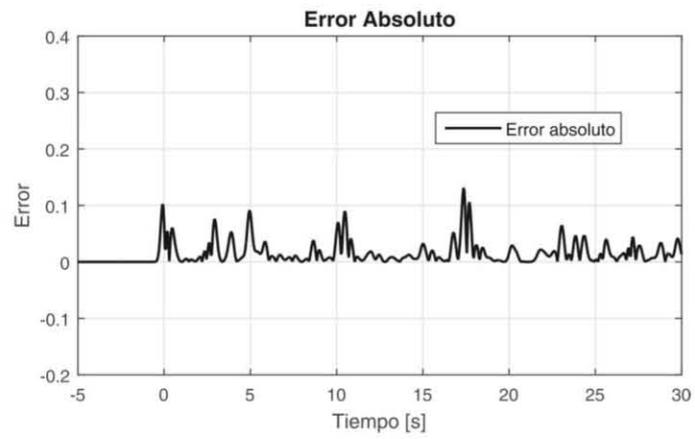
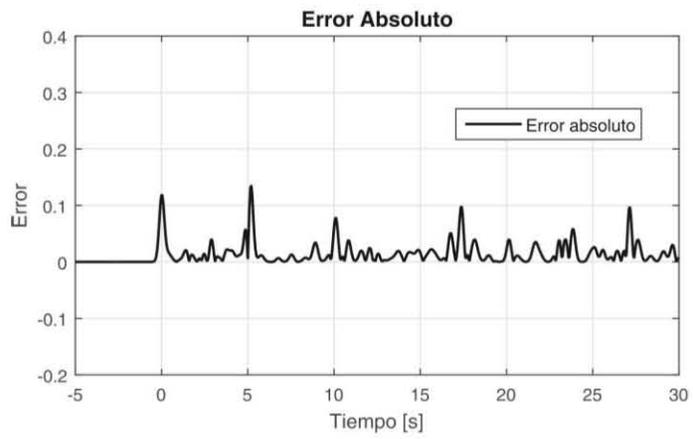
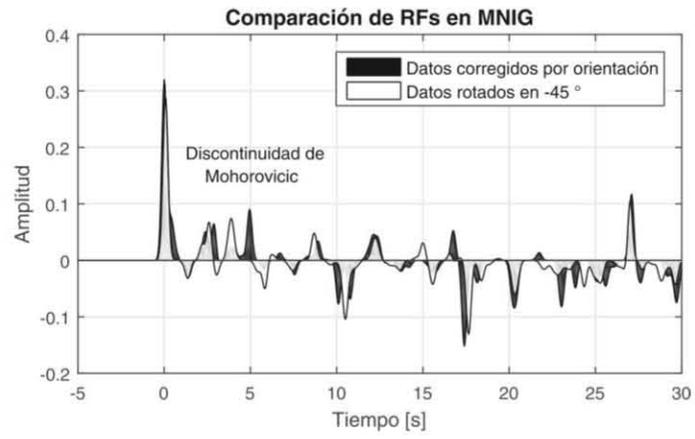
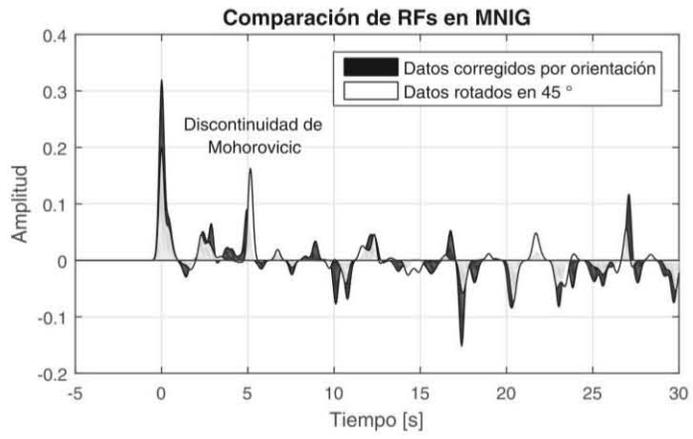


Fig. 5.14 Funciones de receptor (RF) calculadas para la estación MNIG. Se rotaron los datos originales en -45° y 45° .

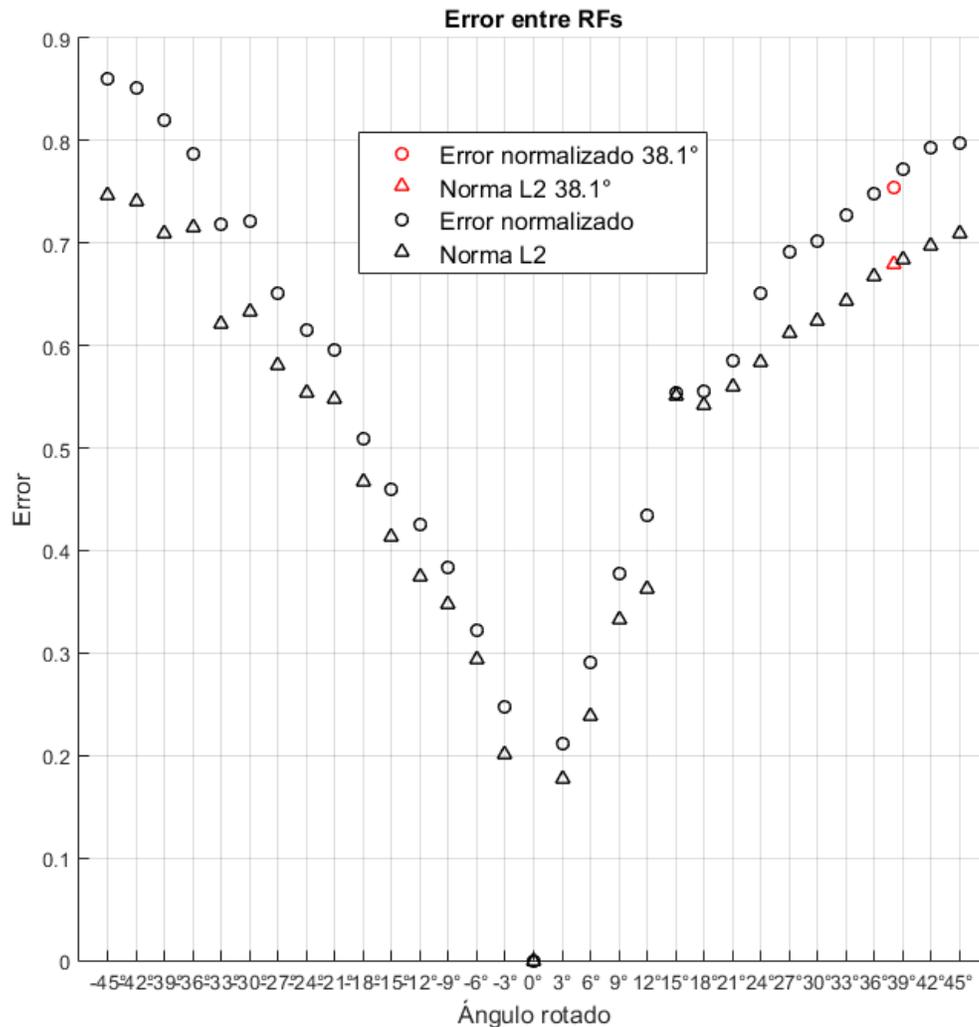


Fig. 5.15 Error entre la FR calculada a partir de componentes horizontales mal orientadas con respecto a la orientación correcta. Se muestra en rojo el error entre la FR original (38.1°) y la FR corregida. El error entre las FRs aumenta al incrementar el ángulo del error de orientación.

Para mostrar el efecto que tiene la mala orientación de las componentes horizontales de los sismómetros, en las localizaciones con una sola estación, el Ing. Daniel González Ávila, del Grupo de Análisis e Interpretación de Datos del SSN, nos proporcionó la localización de cinco eventos del año 2017, ubicados en el estado de Hidalgo, cuyas localizaciones fueron realizadas con la estación DHIG (Demacú, Hidalgo). Esta estación tuvo un error en la orientación, determinada con el giroscopio, de 17.3°, desde el 14 de mayo del 2015 hasta 24 de julio del 2016. La fecha y hora de los cinco eventos relocados son:

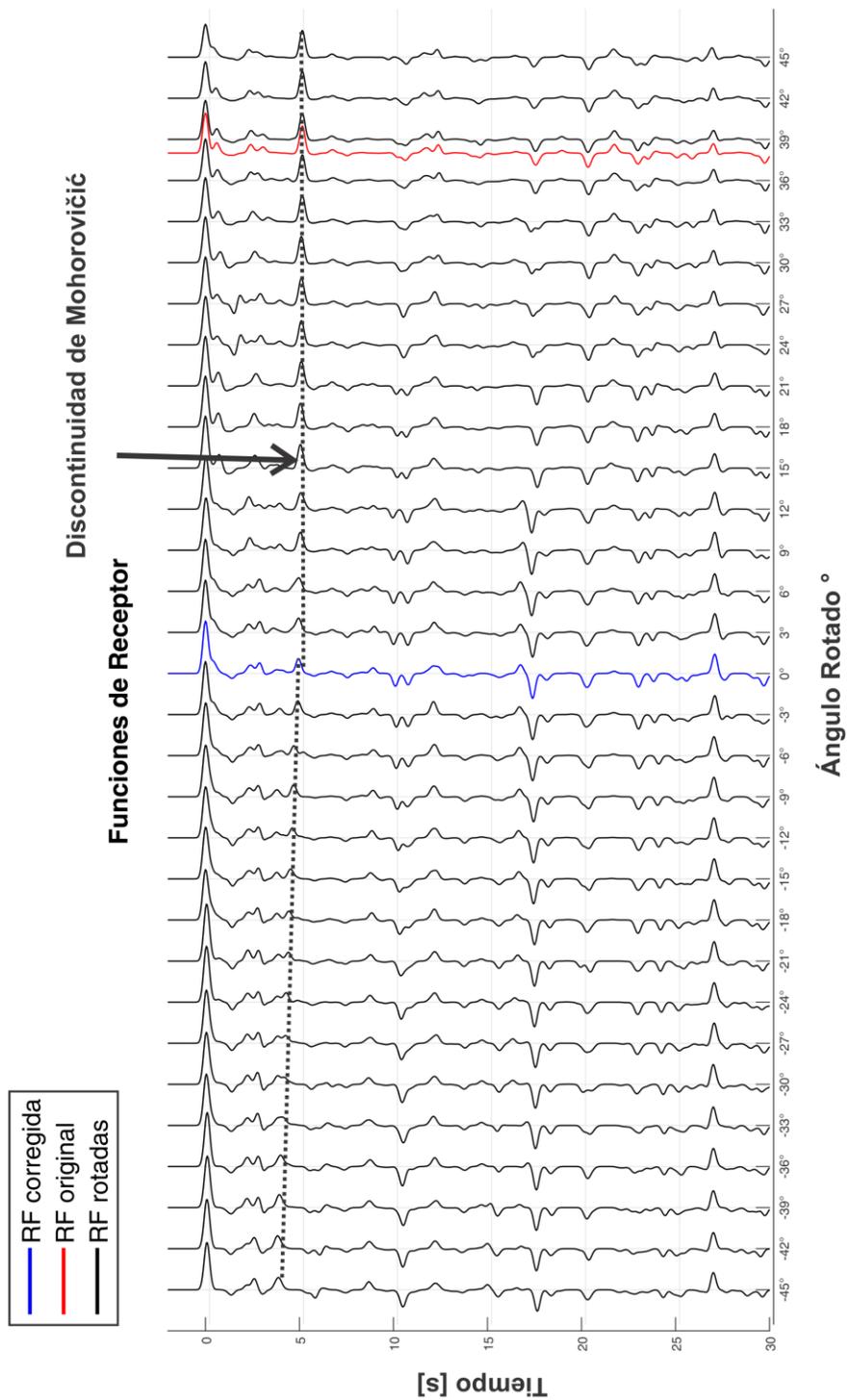


Fig. 5.16 RF calculadas.

Tabla 5.6 Eventos registrados en la estación DHIG.

No.	Magnitud	Longitud [°]	Latitud [°]	Longitud corregida [°]	Latitud corregida [°]	Distancia [km]	Distancia corregida [km]
1	Mc=2.2	-99.065	20.290	-99.0667	20.2992	3.286	3.262
2	Mc=2.3	-99.038	20.311	-99.0347	20.3113	1.219	1.222
3	Mc=2.8	-99.047	20.298	-99.0472	20.3015	1.230	1.227
4	Mc=3.4	-99.085	20.345	-99.0695	20.3577	7.168	7.302
5	Mc=3.2	-99.030	20.344	-99.0173	20.3504	4.8926	4.846

1. 11 de mayo del 2017 16:22
2. 13 de mayo del 2017 09:12
3. 17 de mayo del 2017 17:16
4. 19 de mayo del 2017 17:42
5. 19 de mayo del 2017 23:31

La Tabla 5.6 muestra la información de los eventos, así como su relocalización y su distancia a la estación DHIG.

Para apreciar el error que se tuvo en su momento por la mala orientación del sensor, se rotaron las componentes de cada registro para simular el error que tuvo la estación durante la época 2015-2016. Empleando esas trazas rotadas se relocalizaron los eventos utilizando la función del azimut y localización con una sola estación del programa SEISAN (<http://seis.geus.net/software/seisan/node64.html>).

La Figura 5.17 muestra en amarillo los sismos localizados con las formas de onda originales, en rojo se muestran los eventos relocalizados con las formas de onda rotadas.

La Figura 5.18 muestra una relación lineal entre la distancia del evento y el error de localización. Por lo tanto, podemos concluir que, eventos con mayor distancia a la estación, serán más afectados por el error en la orientación que tenga la estación.

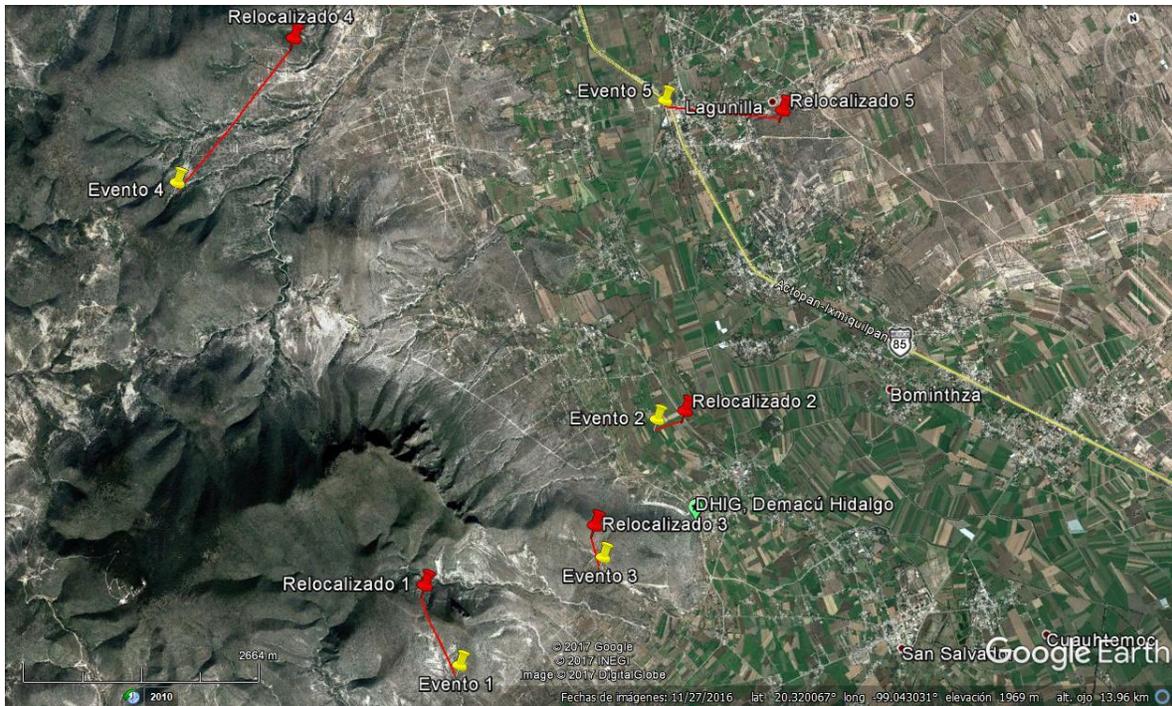


Fig. 5.17 Eventos localizados con las trazas originales (amarillo) y localizados al rotar las trazas en 17.3° (rojo). La estación DHIG se muestra en verde.

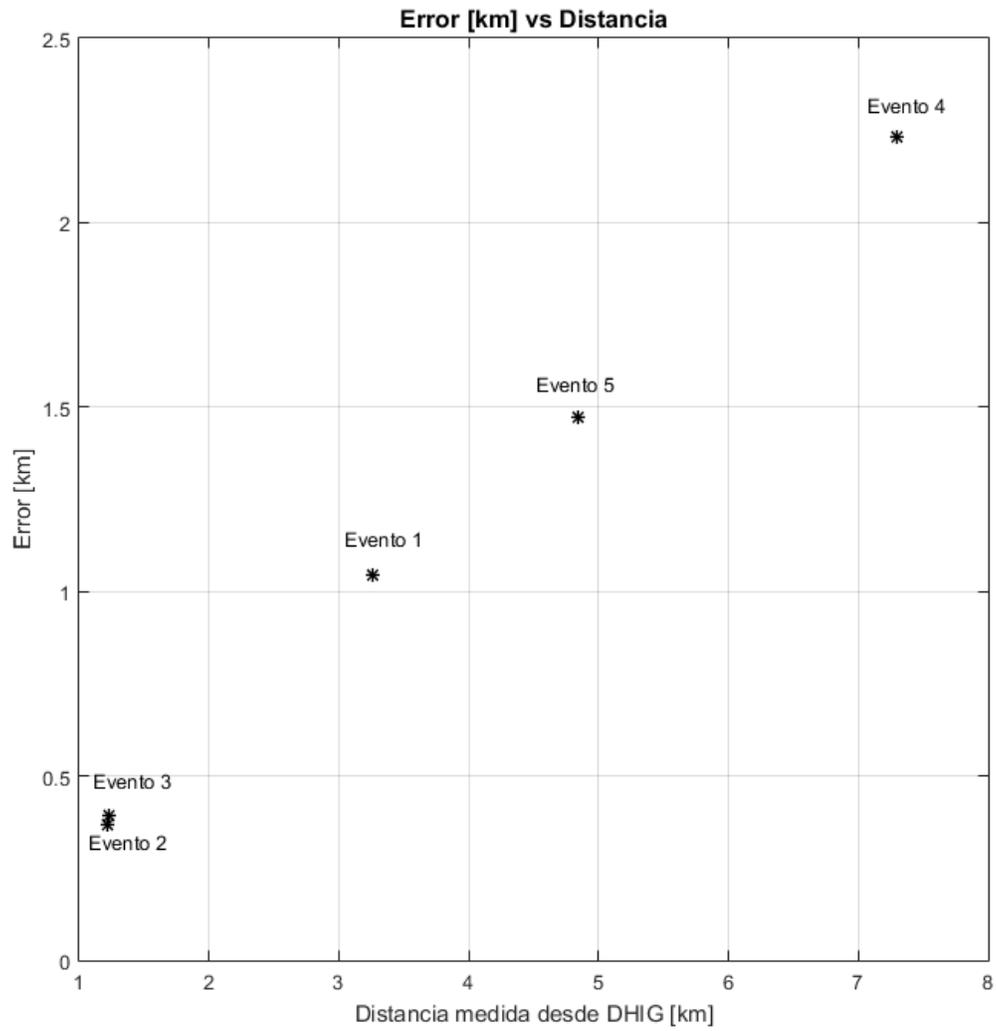


Fig. 5.18 Gráfica de distancia vs error. Para los eventos relocizados

5.4 Conclusiones

En este proyecto se estimó la orientación de los sensores de velocidad que pertenecen a la RBA del SSN. Las estimaciones se realizaron para distintas épocas instrumentales, las cuales fueron validadas con las orientaciones obtenidas con el giroscopio por el personal del Grupo de Instrumentación y Mantenimiento del SSN.

Para la época con información del giroscopio, las estimaciones obtenidas con ondas superficiales indican que únicamente el 30% de las estaciones se encontraban en un rango aceptable de orientación $[-6^\circ \ 6^\circ]$. El análisis de componentes principales indica que el 40% de las estaciones están bien orientadas. El mismo porcentaje que arrojan las mediciones con giroscopio.

La Tabla 5.6 muestra las estimaciones realizadas para la época posterior a la reorientación de la estación. Se comparan con las mediciones del giroscopio para ver si fue corregida la orientación correctamente.

Se concluye que el 60 % de las estaciones que fueron reorientadas y se estimó su orientación (Tabla 5.6), tuvieron una mejora en la orientación del sensor de velocidad.

Las estimaciones obtenidas con el análisis de componentes principales tienden a subestimar el error en la orientación (Figura 5.1). Las estimaciones obtenidas con el método de polarización de ondas Rayleigh, son sobreestimadas; esto se aprecia en las figuras 5.2 y 5.3; no obstante, esta sobreestimación puede ser ocasionada por alguna estructura entre la corteza y el manto. Se tiene documentado que entre 25-35 s, las ondas Rayleigh son sensibles a efectos de la corteza (Foster et al., 2014). En este trabajo los registros se filtraron en periodos entre 25-50 s, por lo tanto, podemos asumir que las estimaciones son afectadas, muy probablemente, por la interacción entre las placas de Cocos, de Rivera y de Norte América. En la Figura 5.19 se muestra la región del país que concentra la mayoría de las estimaciones sobreestimadas.

Sin importar las ventajas y desventajas de uno u otro método, ambos permiten obtener información sobre la orientación del sensor. Se mencionó que ambos algoritmos empleados en este trabajo muestran ambigüedades de 180° , este efecto genera que los intervalos de confianza sean muy grandes. A pesar de la ambigüedad, fue acertada la decisión de tomar la mediana (percentil 50) como estimación del error de orientación; no obstante, se puede realizar un análisis estadístico más complejo para mejorar las estimaciones, como un estimador de máxima verosimilitud o una estimación Bayesiana.

Se pudo observar el efecto de una mala orientación de los sensores de velocidad en la localización de eventos con una sola estación y en el análisis de funciones de receptor. Con base en los resultados del análisis de funciones de receptor, propusimos un intervalo aceptable para la orientación de los sensores triaxiales (-6° a 6°).

Tabla 5.6 Estimaciones después de la corrección del sensor.

Estación	GIROSCOPIO	Actual PCA	Actual POR 1	Actual POR 2
AAIG	6.8	-0.2	1.4	1.4
ANIG	3.5	No	-6	-9
ARIG	15.8	No	6	7.8
CGIG	4.9	7.6	1.9	3.9
CJIG	13.7	-7.4	-7.8	-8
CMIG	7.8	-2.2	0.5	0
CRIG	7.7	No	0.1	0.1
CUIG	13.1	-2.7	1.8	3.8
DAIG	3.8	No	9.6	9.5
FTIG	5.5	-1	8.2	9.1
GTIG	3	No	1.7	2.7
HLIG	11.3	7.1	11.6	12.3
HPIG	-3.3	3.9	3.1	3.1
HUIG	9.74	No	1.5	2.5
IGIG	5.9	No	2.6	5.3
JRQ	-4.5	No	8.2	7.2
LNIG	4.4	-0.2	1.1	4.1
MCIG	9.3	3.3	0.4	-0.11
MEIG	13.1	No	24.8	23
MMIG	12.8	No	-0.9	0.9
MNIG	38.4	No	-3.9	1.6
PDIG	2.3	No	0.3	3.8
PEIG	9.6	6.8	3.7	3.9
PLIG	10.4	No	5.6	8.7
PNIG	16.9	3.7	5.2	5.2
RPIG	6.7	-2.9	2.4	4.2
SPIG	-0.2	0.6	1.9	2.9
TJIG	-90	No	-4.2	-1.9
TOIG	10.6	13.4	10.2	13.2
TPIG	8.2	2.6	2.2	3.2
TXIG	7.5	No	10	12.9
YAIG	5.6	-10.9	12.4	12.4
YOIG	16.8	8.6	6.4	6.5
ZIIG	9.8	-10.5	1.5	5.2

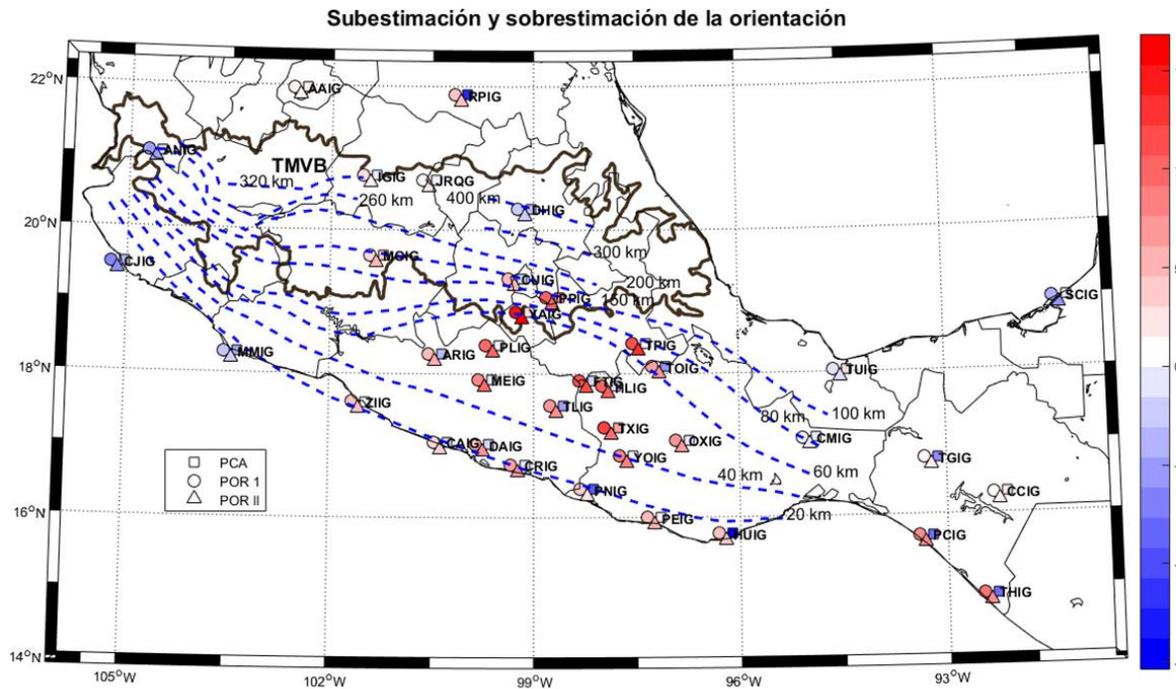


Fig. 5.19 Orientaciones que fueron sobreestimadas (rojo) y subestimadas (azul). El color corresponde a los grados que fue subestimada o sobrestimada. Las líneas discontinuas en azul corresponden a la geometría de la placa de Cocos que proponen Pardo y Suarez (1995). La línea marrón delimita la Faja Volcánica Trans-Mexicana (TMVB en inglés).

El resultado final de este trabajo es un catálogo histórico con las orientaciones de los sensores de velocidad, para las distintas épocas instrumentales de las estaciones de banda ancha del Servicio Sismológico Nacional.

Otro producto de este trabajo es un manual para el uso de los programas realizados en este proyecto con los que se obtuvieron las estimaciones, con el objetivo de ser utilizado y modificado, para todos los sensores de velocidad de las estaciones a cargo del SSN, los sensores de aceleración y las estaciones próximas a instalarse. Se recomienda realizar estimaciones periódicas con estas dos metodologías para los sensores triaxiales de las estaciones del SSN y compararlas con los datos obtenidos del giroscopio con el objetivo de mantener todas las estaciones orientadas entre -6° y 6° . Finalmente, se aconseja realizar una corrección por orientación para aquellas estaciones que estuvieron orientadas fuera del rango propuesto en este trabajo (-6° a 6°).

Bibliografía

- Ammon, C. J., (1991). The isolation of receiver effects from teleseismic *P* waveforms. *Bull Seismol. Soc. Am.*, **81**(1), 2504-2510.
- Anderson, P.N., Duennebeir, F.K. y Cessaro, R.K., 1987. Ocean borehole horizontal seismic sensor orientation determined from explosive charges, *J. Geophys. Res.*, **92** (B5), 3573-3579
- Baillard, C., Crawford, W. C., Ballu, V., Hibert, C. y Mangeney, A. (2014). An automatic Kurtosis-Based P- and S-Phase Picker Designed for Local Seismic Networks, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **104**(1), 394,409, 10.1785/0120120347.
- Baker, G. E., and J. L. Stevens (2004). Backazimuth estimation reliability using surface wave polarization, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, 4 pp., doi 10-1029/1004GL019610.
- Chael, E. P. (1997). An automated Rayleigh-wave detection algorithm, *Bull Seism. Soc. Am.* **87**, 157-163.
- Crotwell, H. P., T. J. Owens, and J. Ritsema (1999). The TauP Toolkit: Flexible seismic travel-time and ray-path utilities, *Seismol. Res. Lett.*, **70**, 154–160.
- Eisermann, A., Ziv, A., Wust-Bloch G., (2015). Real-Time Back Azimuth for Earthquake Early Warning. *Bull Seism. Soc. Am.* **105**, pp -.
- Ekström, G., and R. W. Bursby (2008). Measurements of seismometer orientation at USArray Transportable Array and Backbone stations, *Seismol. Res. Lett.* **79**, no.4, 554-561, doi 10.1785/gssrl.794.554.
- Fontaine, F. R., G. Barruol, B. L. N. Kennet, G. H. R. Bokelmann and D. Reymond (2009). Upper mantle anisotropy beneath Australia and Tahiti from *P* wave polarization: Implications for real-time earthquake location. *J. Geophys. Res.* **114**, no. B03306, doi 10.1029/2008JB005709.
- Foster, A. et al. (2014). Arrival-angle anomalies across the USArray Transportable Array. *Earth Planet. Sci. Lett.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.12.046>
- Khir, M., Wahed A., Senfaute, G., Piguet, J. (2001). Source location estimation using a single station three-component seismic data, *International symposium of the international society for rock mechanics*, Espoo, Finland.
- Jolliffe, I.T. (2002). *Principal Component Analysis*. Springer 2a Ed. U.K. 518 pp.
- Jurkevics, A. (1998). Polarization analysis of three-component array data, *Bull Seism. Soc. Am.* **78**, 1725-1743.
- Laske, G., Masters, G., Zurn, W. (1994). Frequency-dependent polarization measurements of long-period surface waves and their implications for global phase-velocity maps, *Phys. Earth Planet In.* **84**, 111-137.

Laske, G. (1995). Global observation of off-great-circle propagation of long period surface waves, *Geophys. J. Int.*, **123** (1), 245-259.

Lay, T., Wallace, T. (1995). *Modern Global Seismology*, Academic Press 1a Ed E.U. 521pp.

Lerner-Lam, A. L., Park, J. J. (1989). Frequency-dependent refraction and multipathing of 10-100 second surface waves in the Western Pacific. *Geophys. Res Lett.*, **16** (6), 527-530

Li, B., Gavrilov, A., Duncan, A. (2008). The effect of horizontal refraction on back-azimuth estimation from the CTBT Hydroacoustic stations in the Indian Ocean. *3rd International Conference and Exhibition on "Underwater Acoustic Measurements: Technology and Results"*. Centre for Marine Science and Technology, Curtin University of Technology, Australia.

Ligorria, J P., Ammon, C. J. (1999). Iterative Deconvolution and Receiver Function Estimation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 1395-1400

Melgar Moctezuma, D. (2009). El proceso de subducción en la Zona del Istmo de Tehuantepec a partir de funciones de receptor. Facultad de Ingeniería. UNAM. Tesis de Licenciatura. 143 pp.

Navarro, F. (2015). Procedimiento de Instalación para un Observatorio Sismológico de Banda Ancha. *Instituto de Geofísica, SSN, UNAM. Concurso de Oposición Abierto*.

Niu, F., J. Li (2011). Component azimuths of the CEArray stations estimated from P-wave particle motion, *Earthq. Sci.*, **24**, 3-13.

Noda, S., Yamamoto, S., Sato, S., Iwata, N., Korenaga, M., Ashiya K. (2012). Improvement of back-azimuth estimation in real-time by using a single station record., *Earth Planets Space*, **64**, 305-308.

Pardo, M., Suárez, G. (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plate in southern Mexico: Seismic and tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, **100** (B7), 12,357-12,373, 10.1029/95JB00919

Ringler, A. T., Hutt, C. R., Persefield, K., Gee, L. S. (2013). Seismic station installation orientation errors at ANSS and IRIS/USGS stations, *Seismol. Res. Lett.*, **84**, 926–931.

Rodríguez Domínguez, M. A., (2013). Estructura sísmica debajo de la estación sismológica de Tuxtepec, Oaxaca, mediante funciones de receptor. Facultad de Ingeniería. UNAM. Tesis de Licenciatura. 74 pp.

Rodríguez Domínguez, M. A. (2013). Transición del ángulo de subducción de la placa de Cocos en la zona centro-sur de México. Instituto de Geofísica. UNAM. Tesis de Maestría. 72 pp.

- Rueda, J., Mezcuca, J. (2015). Orientation analysis of the Spanish broadband national network using Rayleigh-wave polarization, *Seismol. Res. Lett.*, **86**(3), 525-531.
- Scholz, J. R., Barruol, G., Fontaine, F. R., Sigloch, K., Crawford, W. C., Deen, M. (2016). Orienting ocean-bottom seismometers from *P*-wave and Rayleigh wave polarizations, *Geophys. J. Int.*, **208** (1), 1227-1289.
- Seber, G., Lee A. (2003). *Linear Regression Analysis*; Wiley-Interscience 2a Ed N.Z. 583 pp.
- Selby, N. D. (2001). Association of Rayleigh waves using backazimuth measurements: Application to test ban verification, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **91**, 580-593.
- Shearer, P. (2009). *Introduction to Seismology*, Cambridge University Press 1a U.K. 396pp.
- SSN (2018). <http://www.ssn.unam.mx>. Consultada por última vez el 25 de enero de 2018.
- SSN (2017). Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. URL: <http://www.ssn.unam.mx>, DOI: <https://doi.org/10.21766/SSNMX/SN/MX>.
- Stachnik J. C., Sheehan A. F., Zietlow, D.W., Yang, Z., Collins, J., Ferris, A., (2012). Determination of New Zealand ocean bottom seismometer orientation via Rayleigh-wave polarization, *Seismo. Res. Lett.* **81**,704-713.
- Stein S., Wyssession M. (2003). *An Introduction to Seismology, earthquakes, and Earth structure*; Blackwell Publishing 1a Ed E.U. 498 pp.
- Tanimoto, T., Rivera, L. (2005). Prograde Rayleigh wave particle motion, *Geophys. J. Int.* **162**, 399-405.
- Udías, A. (1999). *Principles of Seismology*; Cambridge University Press 1a U.K. 475pp.
- Wang, X., Chen, Q. F., Li, J., Wei, S. (2016) Seismic Sensor Misorientation Measurements using P-wave particle motion: An application to the NECsarray Array, *Seismol. Res. Lett.*, **87**.
- Walck, C. M., Chael, E. P. (1991). Optimal Backazimuth Estimation for three-component recordings of regional seismic events. *Bull Seismol. Soc. Am.*, **81**, 643-666.
- Zha, Y., Webb, S.C., Menke, W. (2013). Determining the orientations of ocean bottom seismometers using ambient noise correlation. *Geophys. Res. Lett.*, **40**(14), 3585-3590.

Anexos

Anexo A

Tabla de estimaciones completa para la penúltima época.

Clave	Giroscopio	PCA	P5%	P95%	POR1	POR2	P5%1	P95%1	P5%2	P95%2
AAIG	6.8	7.9	-4.2	32.8	7.4	7.4	-27.8	26.4	-30.8	33.8
ANIG	3.5	1.4	-121	69.9	-2.3	-2.2	-28	34.9	-29.2	40.6
ARIG	15.8	11.8	-29.9	57.9	20.1	21.1	-17.4	56.6	-20.3	60.1
CAIG	15.3	13.4	-11.2	39.7	17.9	18.5	-25.2	49.8	-27.2	54.5
CCIG	3.4	4.7	-39.8	33.7	3.5	4.1	-23.1	35.8	-26.6	38.9
CGIG	4.9	4	-53.1	91.9	6	6.5	-27.2	53.5	-35.9	59.2
CJIG	13.7	9.6	-6.7	28.1	6.5	7	-29.8	40.9	-31.4	43.9
CMIG	7.8	6.5	-8.2	21.1	6.8	6.7	-14.2	29.9	-16.8	33.6
CRIG	7.7	6.4	-19.3	29.4	13.8	14.4	-21.2	36.3	-23.1	38.6
CSIG	-11.1	-8.8	-58.8	61.8	-4.9	-4.3	-28.9	23.3	-29.7	29.7
CUIG	13.1	10.9	-16.9	92.5	17.6	17.5	-23.8	49.2	-28.6	55
DAIG	3.8	1.4	-16.4	26.4	8.2	11	-10.4	40.8	-13.9	30.7
DHIG	17.3	13.7	2.6	31.3	14.1	14.2	-13.1	47.5	-16.8	49.8
FTIG	5.5	3.11	-7.8	29.9	16.7	17.1	-9.4	34.7	-10.9	37.7
GTIG	3	7.1	-8.2	34.2	4.4	4.5	-20.1	39	-24.9	38.5
HLIG	11.3	9.2	-0.6	27.3	21.5	21.8	-5	47.7	-5.3	53.1
HPIG	-3.3	-1.2	-17.4	72	2.6	2.4	-22.3	38.6	-24.8	37.4
HSIG	1.7	2	-7	40.5	2	2.1	-29.5	52.5	-28.2	71.7
HUIG	9.74	-5.6	-18.4	21.7	13.8	13.1	-23.7	44.9	-29.3	46.9
IGIG	5.9	4.7	-58.8	28.8	8	7	-24.7	41.4	-29.3	47.8
JRQ	-4.5	-5.4	-24.2	11.3	-3.9	-3	-31.2	49.1	-31.2	53.5
LNIG	4.4	5.2	-8.2	20.6	4.7	4	-19.2	33.6	-22.2	45.2
LPIG	-0.4	1	-20.4	21	-3.3	-3.9	-23	36	-26.1	36.9
LVIG	NA	4.2	-7.4	21.7	7.8	44.6	-26.2	44.6	-25.6	73.2

Clave	Giroscopio	PCA	P5%	P95%	POR1	POR2	P5%1	P95%1	P5%2	P95%2
MAIG	16.1	13	-26.4	35.1	21.9	21.7	-23.6	36	-26.5	39.7
MBIG	0	-3.9	-134	32.6	1.8	-2.4	-15.3	17.5	-19	18.5
MCIG	9.3	14.7	-6.8	31.2	12.4	14.4	-15.4	39.4	-10.9	49.8
MEIG	13.1	11.4	-63.3	41.1	21	23	-4.6	39.9	-9.8	41.8
MMG	12.8	7.8	-17	54.1	9.3	9.8	-15.9	50.1	-18.4	51.9
MNIG	38.4	46.2	-73.8	69.5	28.7	27.9	-17	57.8	-21.2	87.6
MOIG	17.1	19.8	6.6	65.9	19.6	21.7	-27	37.9	-30.2	41.9
MYIG	2	-2.1	-19.2	12.2	5.6	5.3	-23.1	50.4	-24.7	107.5
NZIG	5.8	6.9	-3.9	36.5	5.4	5.3	-16.1	43.9	-17.9	66.3
OXIG	10.3	9.3	-9	27	17.3	16.9	-13.2	40.1	-19.8	40.9
PCIG	-1.5	-10	-21.8	10.1	5.9	6	-27.1	33	-29.4	34.5
PDIG	2.3	2.6	-41.4	60.6	6.1	7.3	-19.8	27.7	-21.4	31.5
PEIG	9.6	9.9	-15.3	21.7	14.1	14.5	-15	46.4	-19.4	52.8
PLIG	10.4	9.5	-26.9	125.8	20.3	20.7	-30.6	79.4	-35.6	86.2
PNIG	16.9	7	-7.8	24.2	20	18.7	-9.7	40.5	-9.7	42.4
PPIG	13.5	21.4	-98.6	69.9	24	23.3	-19.6	41.4	-23.5	45.3
PZIG	NA	-0.5	-30.9	85.5	6.8	6.8	-22.4	32.2	-26	34.3
RPIG	6.7	-6.3	-19.3	120.7	10.5	10.8	-27.3	71.6	-33.1	68.3
SCIG	0.8	-0.6	-12	22.8	-3.9	-5.6	-27.4	26.2	-27.2	36.9
SPIG	-0.2	-5.4	-27.7	132	2.1	2.4	-54.3	44.2	-57.9	50.2
SRIG	21.6	20.4	-47	47	26	26.2	-16	47.5	-14.3	48.7
SSIG	8.3	7.7	-10.4	29	12.5	12.7	-8.4	31.5	-10	36.5
TGIG	1.7	-5.1	-30.9	22.5	2.2	2.9	-31.3	45.2	-36.4	43.8
THIG	-1.4	-	-21.4	40.1	7.6	6	-37.4	165.7	-41.1	155.2
		10.2								
TJIG	-90	NA	NA	NA	-78.7	-79.2	-90.6	128	-92.1	129
TLIG	9.4	3.7	-8.8	10.9	16.3	16.7	-15.2	34.7	-18.2	36.9
TOIG	10.6	4.4	-9.3	51	16.7	17.6	-12.1	33.3	-13.2	37.9

Clave	Giroscopio	PCA	P5%	P95%	POR1	POR2	P5%1	P95%1	P5%2	P95%2
TPIG	8.2	8.4	-0.7	15.5	19.6	21.9	-15.2	45.1	-6.7	101.3
TSIG	-1.7	-3.1	-20.1	36.5	-0.9	-0.4	-24.5	26	-28.6	25.5
TUIG	0	2.4	-12.6	10.3	-1.6	-2	-54	65.3	-56.6	107.2
TXIG	7.5	13.4	-8.6	33.6	20	16.8	-11.5	46.6	-13.8	55
YAIG	5.6	7.4	1.6	21.7	21.2	22.4	-4.8	36.8	-4.2	37.5
YOIG	16.8	16.3	7.5	26.2	25	25.3	6.4	50.2	6.5	47.4
ZAIG	14.5	11.8	7.6	16	16.7	18.9	-16.5	35.3	-25.2	36.1
ZIIG	9.8	9.5	-19.8	21.7	13.7	14	-14	36.8	-14.5	37.5

Anexo B

Estimaciones con Matlab

Este anexo muestra la metodología para obtener las estimaciones de la orientación de los sensores triaxiales por medio del análisis de componentes principales (PCA) y con la polarización de ondas Rayleigh (POR) utilizando los programas PORPRINCIPAL.m y PCAPRINCIPAL.m cuyo código se muestra al final de este anexo.

Lo primero es seleccionar el catálogo de eventos que cumplan con las características requeridas para ambas metodologías. Los eventos para PCA deben localizarse entre 30°-90° de distancia de la estación y magnitud mayor que 5.5. Los eventos para POR deben ubicarse a distancias mayores que 30°, con profundidad menor que 100 km y magnitud mayor que 6.0.

Una vez seleccionado el catálogo de eventos, se descargan las tres componentes de los registros en formato .sac y se pre procesan. El pre-proceso consta de aplicar una ventana Coseno (Tukey) con 10%, filtrar los registros entre 1 - 60 s y si es necesario se deciman los registros a 20 muestras por segundo.

Ya con los eventos descargados y pre procesados, para PCA se calculan los primeros arribos con Tau-P y se aplica el algoritmo de picado automático propuesto por Baillard (2014) e implementado por Rodríguez (2013).

Se recomienda tener al menos 20 eventos para realizar la estimación de la orientación utilizando alguna de los dos algoritmos. Lo siguiente es ejecutar los programas principales PCAPRINCIPAL.m o PORPRINCIPAL.m.

Código PCAPRINCIPAL.m

```
%%%% PROGRAMA PARA EL CALCULO DEL AZIMUT INVERSO REAL
%%%% UTILIZANDO EL ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)

%%%% UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
%%%% FACULTAD DE INGENIERIA, INGENIERIA GEOFISCA
%%%% MIGUEL ANGEL PEREZ-VELAZQUEZ

clc
clear
cont=1;
%%%%CARGAR TODOS LOS ARCHIVOS .SAC DE LA CARPETA
%COMPONENTE VERTICAL
filesZ = dir('*HZ.sac');
filesZ = {filesZ.name}';
%COMPONENTE NORTE
filesN = dir('*HN.sac');
filesN = {filesN.name}';
%COMPONENTE ESTE
filesE = dir('*HE.sac');
filesE = {filesE.name}';
%CATALOGO (DEPENDEN DE LA ESTACION)
name=filesZ{1,1};
dir=['E:\TESIS_PREPRO\PCA\catalogos\eventos',name(19:22),'.dat']
catalogo=load(dir);
fechas=catalogo(:,1:5);
%TOTAL DE ARCHIVOS ::
NZ=size(filesZ,1);NN=size(filesN,1);NE=size(filesE,1);
t_componentes=[NZ NN NE];
[minv indx]= min(t_componentes);

%%INICIO PARA LEER TODOS LOS EVENTOS
MCOV=zeros(3);
for l=1:minv
%ELECCION DE LOS ARCHIVOS
    if indx == 1
        fileZ = filesZ{l,1};
        fileN = [fileZ(1:25) 'N.sac'];
        fileE = [fileZ(1:25) 'E.sac'];
    end
    if indx == 2
        fileN = filesN{l,1};
        fileZ = [fileN(1:25) 'Z.sac'];
        fileE = [fileN(1:25) 'E.sac'];
    end
    if indx == 3
        fileE = filesE{l,1};
        fileZ = [fileE(1:25) 'Z.sac'];
        fileN = [fileE(1:25) 'N.sac'];
    end
%FIN DE ELECCION

%SE BUSCA EL EVENTO EN EL CATALOGO DE EVENTOS USANDO EL NOMBRE DEL
ARCHIVO SAC
% INFO DEL EVENTO
ano=str2num(fileE(1:4));
```

```

mes=str2num(fileE(5:6));
dia=str2num(fileE(7:8));
hora=str2num(fileE(9:10));
minuto=str2num(fileE(11:12));
%SE GUARDA LA INFORMACION DE LA FECHA DEL EVENTO SAC EN INFO
%SE ENCUENTRA LA INFORMACION DEL EVENTO *.sac EN EL CATALOGO DE EVENTOS
info=[ano mes dia hora minuto];
I= find(catalogo(:,1)==info(1) & catalogo(:,2)==info(2)
&catalogo(:,3)==info(3) & catalogo(:,4)==info(4)
&catalogo(:,5)==info(5));
data_evento=catalogo(I,:);%SE CARGA LA INFORMACION DEL EVENTO EN
DATA_EVENTO
%ANHO MES DIA HORA MINUT SEGUNDOS
%LATITUD, LONGITUD, PROFUNDIDAD, MAGNITUD DEL EVENTO

%LATITUD, LONGITUD, PROFUNDIDAD, MAGNITUD DEL
EVENTO,distancia,azimut_inverso, taup_time
lat_evento=data_evento(7);lon_evento=data_evento(8);h_evento=
data_evento(9);mag_evento=data_evento(10);
d=data_evento(11);baz=data_evento(12);tP=data_evento(13);
%%% EVENTOS CON DISTANCIAS ENTRE 30 Y 90 ° H < 100km
if (d<30 | d>90 | h_evento>100 |tP==0 |mag_evento<=6.0)
    %NO EXISTE FASE Pn EN ESTAS DISTANCIAS

else
    %INGRESA AL PROGRAMA PRINCIPAL

%%% Se leen los archivos:
%COMPONENTE VERTICAL Z
signalZ= rsac(fileZ);
tZ=signalZ(:,1);
Z=signalZ(:,2);
nz=floor(size(Z,1)*0.25);
%COMPONENTE HORIZONTAL NORTE N
signalN= rsac(fileN);
tN=signalN(:,1);
N=signalN(:,2);
nn=floor(size(N,1)*0.25);
%COMPONENTE HORIZONTAL ESTE E
signalE= rsac(fileE);
tE=signalE(:,1);
E=signalE(:,2);
ne=floor(size(E,1)*0.25);
%-----
v2=max([max(abs(N)) max(abs(E)) max(abs(Z))]);
v1=-v2;%ESCALA VERTICAL
if (v1==0 | v2==0)
    v1=-1;v2=1;
end

t01=lh(signalZ,'T0');
t0=tP;
if tP<=t01+5 & tP>=t01-5
    t0=t01;
end
%FIGURA DEL EVENTO

```

```

h_1=figure,set(h_1, 'Visible',
'off'),subplot(3,1,2),plot(tN(1:nn),N(1:nn),'b');grid
on;ylabel('Cuentas');legend('Componente N');ylim([v1 v2])
    subplot(3,1,3),plot(tE(1:ne),E(1:ne));grid
on;ylabel('Cuentas');legend('Componente E');ylim([v1 v2])
    subplot(3,1,1),plot(tZ(1:nz),Z(1:nz),tP,0,'ro',t0,0,'go');grid
on;xlabel('tiempo [s]');ylabel('Cuentas');...
        ylim([v1 v2]);legend('Componente Z');;title(['Evento '
fileZ(1:14) ' Estacion ' fileZ(19:22)])
% t1 ES EL TIEMPO DE ARRIVO DE LA FASE P -0.5 s
% t2 ES EL TIEMPO DE ARRIVO DE LA FASE P + 10.5 s

        t1=t0-0.5;
        t2=t0+10.5;
        dt=tZ(2)-tZ(1);
ind=find(tZ<t1+dt & tZ>t1-dt);
%PUEDEN SER UNO O DOS VALORES QUE CUMPLAN LA CONDICION
    if numel(ind)==0
ind1=ind;
        else
ind1=ind(1);
        end
ind=find(tZ<t2+dt & tZ>t2-dt);

        if numel(ind)==0
ind2=ind;
        else
ind2=ind(1);
        end
if isempty(ind2)==1 | isempty(ind1)==1
    % no hace nada
else
%VENTANA DE LAS OTRAS COMPONENTES N E Y ZH
    nv=ind2-ind1+1;
    ventana=tukeywin(nv,0.05);

    VN=ventana.*N(ind1:ind2);
    VE=ventana.*E(ind1:ind2);
    VZ=ventana.*Z(ind1:ind2);

%%MATRIZ DE COVARIANZA 3x3 (TRAZA)
MCOV(1,1)=trapz(VN.*VN,tN(ind1:ind2));MCOV(2,2)=trapz(VE.*VE,tN(ind1:ind2
));MCOV(3,3)=trapz(VZ.*VZ,tZ(ind1:ind2));
%MATRIZ DE COVARIANZA
MCOV(1,2)=trapz(VN.*VE,tE(ind1:ind2));MCOV(2,1)=MCOV(1,2);
MCOV(1,3)=trapz(VN.*VZ,tE(ind1:ind2));MCOV(3,1)=MCOV(1,3);
MCOV(3,2)=trapz(VE.*VZ,tN(ind1:ind2));MCOV(2,3)=MCOV(3,2);
% EIGENVALORES D y EIGENVECTORES D
    [V,D] = eig(MCOV);
    %EXPRESION DEL AZIMUT INVERSO Niu & Li (2011) & Wang et al 2016
    valor=(MCOV(2,2)-MCOV(1,1)+sqrt((MCOV(1,1)-
MCOV(2,2)).^2+(2*MCOV(1,2)).^2))./(2*MCOV(1,2));
    baz_calculado=acot(valor)*(180/pi);
%SNR= MIN EIGENVAL / MAX EIGENVAL
SNR=min(abs([D(2,2) D(1,1)]))/max(abs([D(2,2) D(1,1)]));
% AJUSTE PARA OBTENER LA CORRECCION DEL EVENTO

```

```

if baz>=90 & baz<=270
    baz_calculado=180-baz_calculado;%azimut calculado
    correccion=baz-(baz_calculado);

elseif baz>270
    baz_calculado=360-baz_calculado;%azimut calculado
    correccion=baz-(baz_calculado);

else
    correccion=baz-baz_calculado;
end
%ANHO MES DIA HORA MINUT SEGUNDOS, LATITUD, LONGITUD, PROFUNDIDAD,
MAGNITUD
%DISTANCIA, AZIMUNT GEOMETRICO,AZIMUT CALCULADO,CORRECCION,SNR
DATOS(cont,:)= [data_evento(1:12) baz_calculado correccion SNR];

%FIGURA 2 VENTANA DE LA FASE P SELECCIONADA
%LIMITES MAXIMOS Y MINIMOS
v2=max([max(abs(VN)) max(abs(VE)) max(abs(VZ))]);
v1=-v2;
if (v1==0 | v2==0)
    v1=-1;v2=1;
end
h_2=figure,set(h_2, 'Visible',
'off'),subplot(3,1,1),plot(tZ(ind1:ind2),VZ);grid
on;ylabel('Cuentas');legend('Componente Vertical');...
    title(['Evento ' fileZ(1:14) ' Estacion ' fileZ(19:22)]);ylim([v1
v2]);
    subplot(3,1,2),plot(tN(ind1:ind2),VN);grid
on;ylabel('Cuentas');legend('Componente Norte');ylim([v1 v2]);
    subplot(3,1,3),plot(tE(ind1:ind2),VE);grid on;xlabel('tiempo
[s]');ylabel('Cuentas');...
    legend('Componente Este');ylim([v1 v2]);

saveas(h_1,[fileZ(1:14) 'EventoPCA'],'png');
saveas(h_2,[fileZ(1:14) 'VentanaPCA'],'png');
close(h_1);
close(h_2);
cont=cont+1
%FIN PROGRAMA PRINCIPAL
end

end

end

%ANHO MES DIA HORA MINUT SEGUNDOS, LATITUD, LONGITUD, PROFUNDIDAD,
MAGNITUD
%DISTANCIA, AZIMUNT GEOMETRICO,AZIMUT CALCULADO,CORRECCION,SNR
fileID = fopen([fileZ(19:22),'PCA','.dat'],'w');
fprintf(fileID,'%g %g \n',DATOS');
fclose(fileID);
%PROGRAMA PARA DESPLEGAR LA ROSETA
PCAII([fileZ(19:22),'PCA',' .dat'],fileZ(19:22))

```

Código PORPRINCIPAL.m

```
%%%% PROGRAMA PARA EL CALCULO DEL AZIMUT INVERSO REAL
%%%% UTILIZANDO LA POLARIZACION DE ONDAS RAYLEIGH

%%%% UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
%%%% FACULTAD DE INGENIERIA, INGENIERIA GEOFISCA
%%%% MIGUEL ANGEL PEREZ-VELAZQUEZ

clc
clear
%Se carga el catalogo de eventos
%catalogo=load('E:\FORTRAN\Programas_Principales\eventos2001_2016.dat');
catalogo=load('E:\FORTRAN\Programas_Principales\eventostodos.dat');
fechas=catalogo(:,1:5);%SE GUARDAN LAS FECHAS DEL CATALOGO EN UNA MATRIZ
cont=1;
%%%%CARGAR TODOS LOS ARCHIVOS .SAC
%COMPONENTE VERTICAL
filesZ = dir('*HZ.sac');
filesZ = {filesZ.name}';
%COMPONENTE NORTE
filesN = dir('*HN.sac');
filesN = {filesN.name}';
%COMPONENTE ESTE
filesE = dir('*HE.sac');
filesE = {filesE.name}';
%TOTAL DE ARCHIVOS ::
NZ=size(filesZ,1);NN=size(filesN,1);NE=size(filesE,1);
t_componentes=[NZ NN NE];
[minv indx]= min(t_componentes);
%SE CARGAN LAS COORDENADAS DE LA ESTACION
fileZ = filesZ{1,1};
signalZ= rsac(fileZ);
[lat_estacion,lon_estacion] = lh(signalZ,'STLA','STLO')
%%%INICIO PARA LEER TODOS LOS EVENTOS
for l=1:minv%

%ELECCION DE LOS ARCHIVOS -----
    if indx == 1 % HAY MENOS COMPONENTES Z
        fileZ = filesZ{1,1};
        fileN = [fileZ(1:25) 'N.sac'];
        fileE = [fileZ(1:25) 'E.sac'];
        % fileZH= [fileZ '.h'];
    end
    if indx == 2 % HAY MENOS COMPONENTES N
        fileN = filesN{1,1};
        fileZ = [fileN(1:25) 'Z.sac'];
        fileE = [fileN(1:25) 'E.sac'];
        %fileZH= [fileZ '.h'];
    end
    if indx == 3 %HAY MENOS COMPONENTES E
        fileE = filesE{1,1};
        fileZ = [fileE(1:25) 'Z.sac'];
        fileN = [fileE(1:25) 'N.sac'];
        %fileZH= [fileZ '.h'];
    end
end
end
```

```

end
%FIN DE     ELECCION

%SE BUSCA EL EVENTO EN EL CATALOGO DE EVENTOS USANDO EL NOMBRE DEL
ARCHIVO SAC
% INFO DEL EVENTO
ano=str2num(fileE(1:4));
mes=str2num(fileE(5:6));
dia=str2num(fileE(7:8));
hora=str2num(fileE(9:10));
minuto=str2num(fileE(11:12));
info=[ano mes dia hora minuto]; %SE GUARDA LA INFORMACION DE LA FECHA DEL
EVENTO SAC EN INFO
%SE ENCUENTRA LA INFORMACION DEL EVENTO *.sac EN EL CATALOGO DE EVENTOS
I= find(catalogo(:,1)==info(1) & catalogo(:,2)==info(2)
&catalogo(:,3)==info(3) & catalogo(:,4)==info(4)
&catalogo(:,5)==info(5));

%evento no encontrado-----
if isempty(I)==1
    %no existe el evento en el catálogo
else
data_evento=catalogo(I,:);%SE CARGA LA INFORMACION DEL EVENTO EN
DATA_EVENTO
%ANHÓ MES DIA HORA MINUT SEGUNDOS
%LATITUD, LONGITUD, PROFUNDIDAD, MAGNITUD DEL EVENTO
lat_evento=data_evento(7);lon_evento=data_evento(8);h_evento=
data_evento(9);mag_evento=data_evento(10);
%DISTANCIA DE LA ESTACION AL EVENTO Y AZIMUT INVERSO ESTACION-EVENTO
%(lat_estacion,longitud_estacion,latitud_evento,longitud_evento)
[d baz]=distance(lat_estacion,lon_estacion,lat_evento,lon_evento);

%SOLO SE TOMAN LOS EVENTOS CON PROFUNDIADA MENOR QUE 100 km & MAGNITUD
%MAYOR QUE 6
if (h_evento<100 & mag_evento>=6 & d>11)
%% Se leen los archivos:
%COMPONENTE VERTICAL Z
    signalZ= rsac(fileZ);
    tZ=signalZ(:,1);
    Z=signalZ(:,2);
%Potencia Sz
    dtz=tZ(2)-tZ(1);
    Sz=trapz(Z.^2);%./(dt.*size(Z,1));
%COMPONENTE HORIZONTAL NORTE N
    signalN= rsac(fileN);
    tN=signalN(:,1);
    N=signalN(:,2);
%COMPONENTE HORIZONTAL ESTE E
    signalE= rsac(fileE);
    tE=signalE(:,1);
    E=signalE(:,2);
%COMPONENTE TRANSFORMADA DE HILBERT COMPONENTE VERTICAL Z
    %signalZH= rsac(fileZH);
    %tZH=signalZH(:,1);
    %ZH=signalZH(:,2);

```

```

%Se filtran las componetes 0.02-0.04
N=bpfilter(N,0.03,0.05,dtz);
E=bpfilter(E,0.03,0.05,dtz);
Z=bpfilter(Z,0.03,0.05,dtz);
%ZH=bpfilter(ZH,0.02,0.04,dtz);
ZH=imag(hilbert(Z));

%%% SE CARGAN LOS TIEMPOS OBTENIDOS CON EL ESPECTROGRAMA
% [t1 t2]=lh(signalZ,'T1','T2');
%%% SE OBTIENEN LOS TIEMPOS OBTENIDOS CON EL ESPECTROGRAMA
[t1 t2]=autosurfII(tZ,Z);%PROGRAMA DE PICADO AUTOMATICO ONDAS
SUPERFICIALES

%LIMITES DE LA ESCALA
v2=max([max(abs(N)) max(abs(E)) max(abs(Z))]);
v1=-v2;
if (v1==0 | v2==0)
    v1=-1;v2=1;
end
if isempty(t1)==1 | isempty(t2)==1
    t1=0;t2=0;
end
%-----
%FIGURA DEL EVENTO
h_1=figure,set(h_1, 'Visible', 'off'),subplot(3,1,1),plot(tN,N);grid
on;ylabel('Cuentas');legend('Componente N');title(['Evento ' fileZ(1:14)
' Estacion ' fileZ(19:22)]);ylim([v1 v2])
subplot(3,1,2),plot(tE,E);grid
on;ylabel('Cuentas');legend('Componente E');ylim([v1 v2])
subplot(3,1,3),plot(tZ,Z,'b',tZ,ZH,'r',t1,0,'ko',t2,0,'ko');grid
on;xlabel('tiempo [s]');ylabel('Cuentas');...
ylim([v1 v2]);legend('Componente Z','Transformada de Hilbert');
dt=tZ(2)-tZ(1);
%SE OBTIENEN LOS INDICES DE LOS TIEMPOS
index1=round((t1-30)/dt)+1;
index2=round((t2+30)/dt)+1;
% SE LIMITAN LOS RANGOS DE LOS INDICES SI EXCEDEN EL TAMANHO DE LA SENHAL
if index2> size(signalZ,1) | index2> size(signalN,1) |index2>
size(signalE,1)
    mintamanho=min([size(signalZ,1) size(signalN,1) size(signalE,1)]);
    index2=mintamanho;
end
%SE EVITAN LOS INDICES 0
if index1<=0 | index2<=0
    index1=0;
    index2=0;
end

%SE GENERA VENTANA COSENO/TUKEY CON 10%
nv=index2-index1+1;
ventana=tukeywin(nv,0.05);
%LOS INDICES DEBEN SER DISTINTOS 0

%SE INGRESA AL PROGRAMA PRINCIPAL-----
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$

```

```

    if index2> 0 && index1 >0
        VZ=ventana.*Z(index1:index2); %VENTANA Z
    %POTENCIA DE LA VENTANA VZ
        Svz=trapz(VZ.^2);%./(dtz.*size(VZ,1));
    %VENTANA DE LAS OTRAS COMPONENTES N E Y ZH
        VN=ventana.*N(index1:index2);
        VE=ventana.*E(index1:index2);
        VZH=ventana.*ZH(index1:index2);%TRANSFORMADA DE HILBERT
    %ALGORIMO DE POLARIZACION DE ONDAS RAYLEIGH
        [MATRIZ]=POR(VN,VE,VZH);%PROGRAMA DE POLARIZACION DE ONDAS RAYLEIGH
        snr=10*log10(Svz/Sz);%POTENCIA DE LA VENTANA ENTRE EL EVENTO
    %SE OBTIENEN LOS DOS AZIMUT INVERSOS CALCULADOS
        [coeficiente baz_calculado]= max(MATRIZ(:,2));% LA VARIABLE MATRIZ
    CONTIENE LAS 2 CORRELACIONES
        baz_calculado=bas_calculado -1;
        [coeficiente2 baz_calculado2]= max(MATRIZ(:,3));
        baz_calculado2=bas_calculado2-1;
    %SE OBTIENE LA CORRECCION= BAZ-BAZ_CALCULADO
    correccion=bas-bas_calculado;
    correccion2=bas-bas_calculado2;
    %SE GUARDA LA INFORMACION %LATITUD, LONGITUD, PROFUNDIDAD, MAGNITUD DEL
    %EVENTO,DISTANCIA, AZIMUNT GEOMETRICO,AZIMUT CALCULADO1,AZIMUT CALULADO2
    %CORRECCION 1, CORRECCION2 ,COHERENCIA MAXIMA, SNR
    DATOS(cont,:)=[data_evento d baz baz_calculado baz_calculado2 correccion
    correccion2 coeficiente snr];
    cont=cont+1

% IMAGEN DEL COEFICIENTE DE CORRELACION EN FUNCION DEL AZIMUT-----
h_2=figure,set(h_2, 'Visible', 'off'),plot(MATRIZ(:,2),MATRIZ(:,1),'b--
',MATRIZ(:,3),MATRIZ(:,1),'k--
',coeficiente,baz_calculado,'ro',coeficiente2,baz_calculado2,'ko'...
',coeficiente,baz,'go');grid on;xlabel('Azimut');ylabel('Azimut
');xlabel('Coeficiente');legend('M covarianza 1','M covarianza', ...
'Azimut calculado 1','Azimut calculado 2','Azimut inverso
geométrico');title(['Evento ' fileZ(1:14) ' Estación '
fileZ(19:22)]);xlim([-1.1 1.1]);
%%guardar FIGURA
%savefig(h_2,[fileZ(1:14) 'Coherencia']);
%LIMITES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE LAS VENTANAS DEL REGISTRO
v2=max([max(abs(VN)) max(abs(VE)) max(abs(VZ))]);
v1=-v2;
if (v1==0 | v2==0)
    v1=-1;v2=1;
end
%VENTANAS SELECCIONADAS PARA EL CALCULO DEL EVENTO
h_3=figure,set(h_3, 'Visible',
'off'),subplot(3,1,1),plot(tN(index1:index2),ventana.*N(index1:index2));g
rid on;ylabel('Cuentas');legend('Componente N');title(['Evento '
fileZ(1:14) ' Estacion ' fileZ(19:22)]);ylim([v1 v2])
    subplot(3,1,2),plot(tE(index1:index2),ventana.*E(index1:index2));grid
on;ylabel('Cuentas');legend('Componente E');ylim([v1 v2])

subplot(3,1,3),plot(tZ(index1:index2),ventana.*Z(index1:index2),'b',tZ(in
dex1:index2),ventana.*ZH(index1:index2),'r');grid on;xlabel('tiempo
[s]');ylabel('Cuentas');...
    ylim([v1 v2]);legend('Componente Z','Transformada de Hilbert');

```


Anexo C

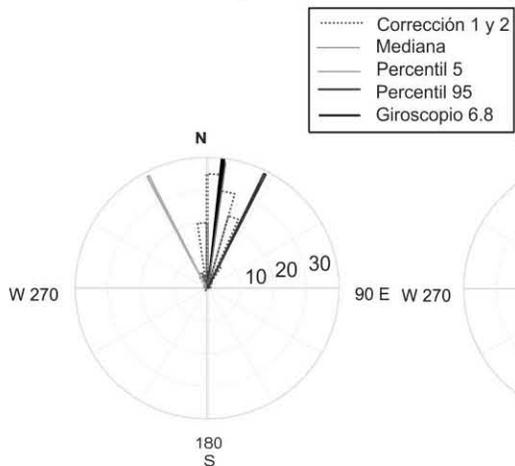
Rosetas de las estimaciones para todas las épocas

Aguascalientes, Aguascalientes

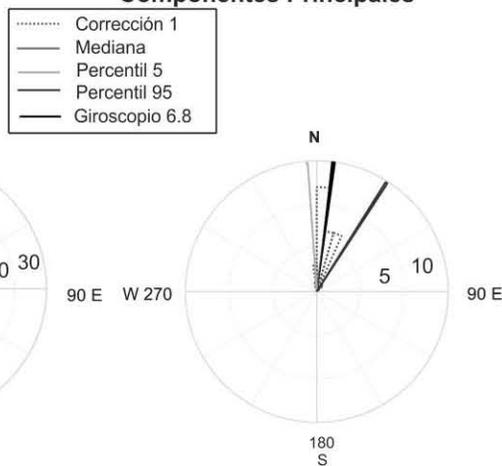
Época I

Fecha: 04/04/2014 - 21/01/2016
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : PBB-200S

Estimación por medio de ondas Rayleigh



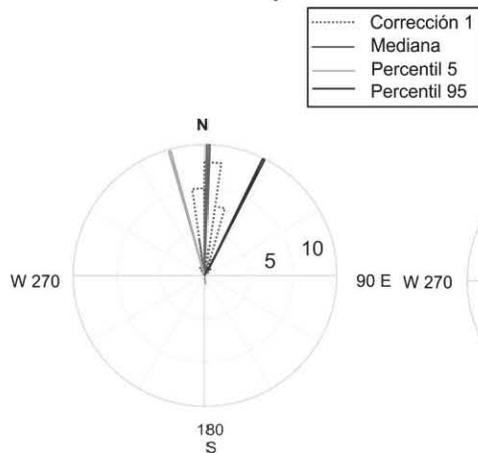
Estimación por medio de Componentes Principales



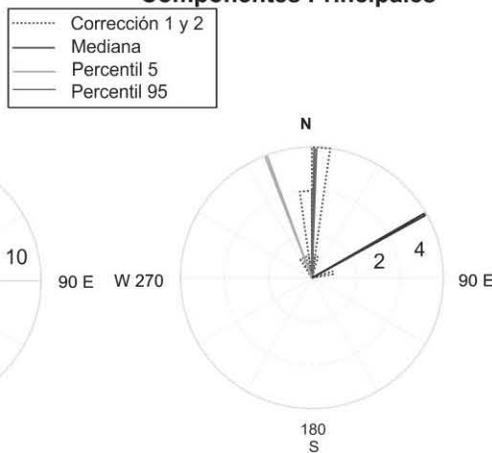
Época II

Fecha: 21/01/2016 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : PBB-200S

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-4.2	7.9	32.8
POR I	-27.8	7.4	26.4
POR II	-30.8	7.4	33.8

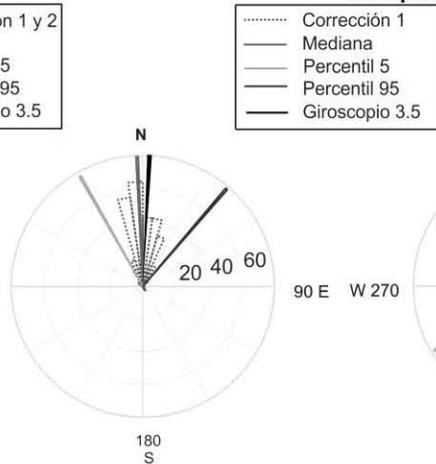
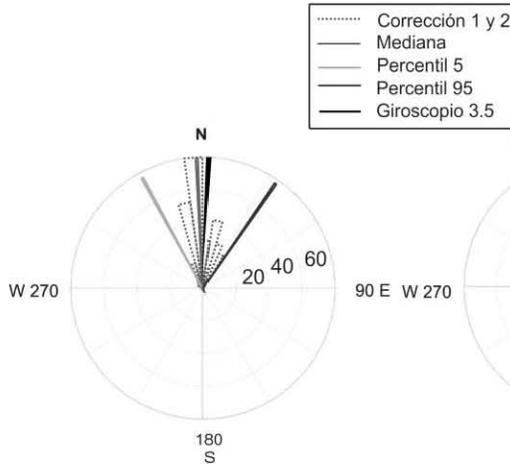
Época II	P5	P50	P95
PCA	-20.9	1.4	60.8
POR I	-15.2	1.4	24.9
POR II	-23.5	-0.2	22.9

Ahuacatlán, Nayarit

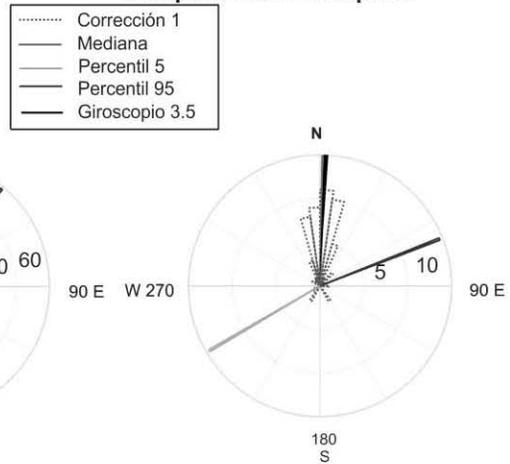
Época I

Fecha: 28/09/2006 - 19/12/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



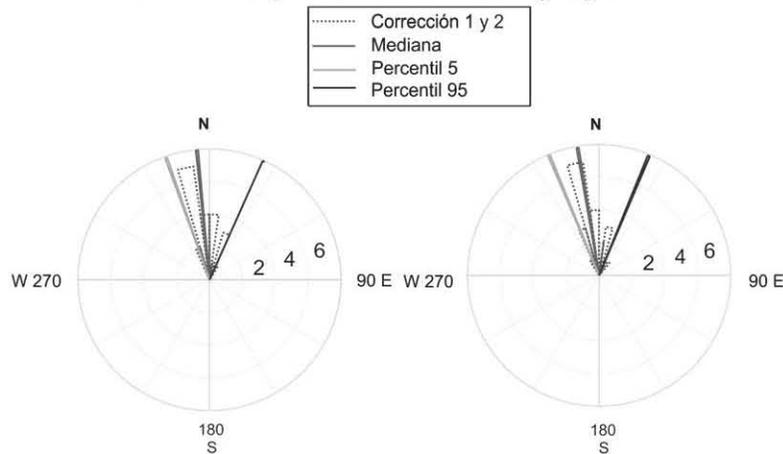
Estimación por medio de Componentes Principales



Época II

Fecha: 19/12/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Época I	P5	P50	P95
PCA	-120.7	1.4	69.9
POR I	-28.0	-2.3	34.9
POR II	-29.2	-2.2	40.6

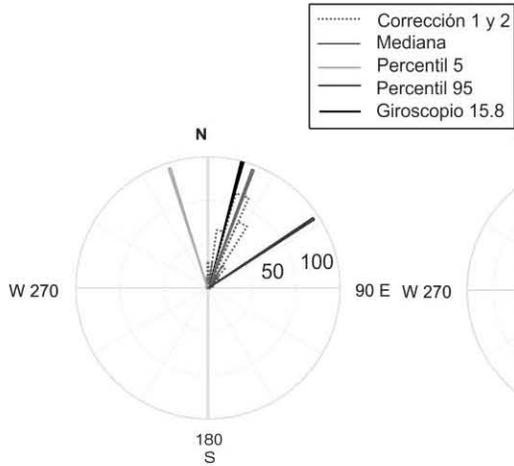
Época II	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-19.5	-6.0	24.9
POR II	-22.0	-9.0	22.9

Arcelia, Guerrero

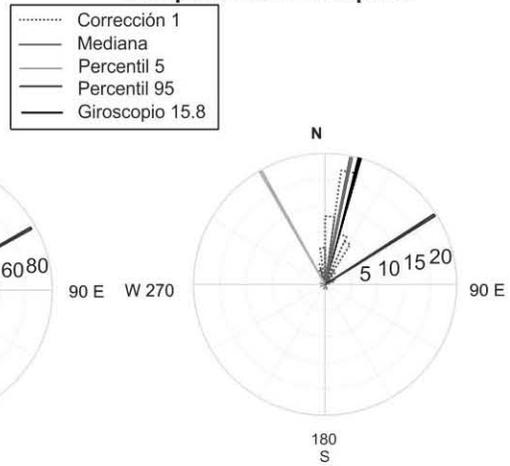
Época I

Fecha: 08/03/2009 - 01/12/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



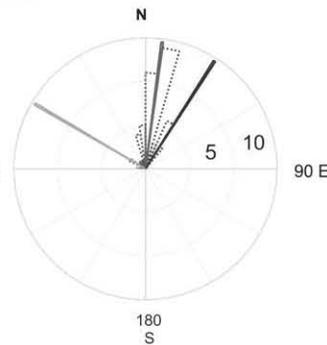
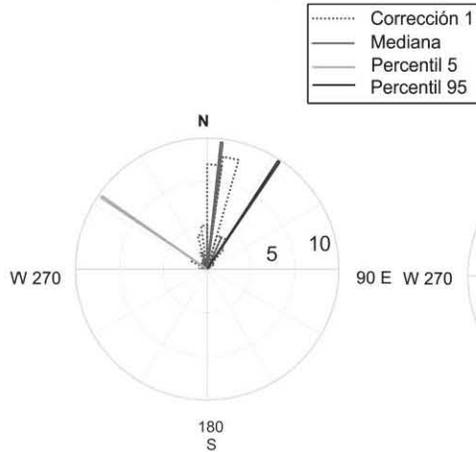
Estimación por medio de Componentes Principales



Época II

Fecha: 01/12/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Época I	P5	P50	P95
PCA	-29.9	11.8	57.9
POR I	-17.4	20.1	56.6
POR II	-20.3	21.1	60.1

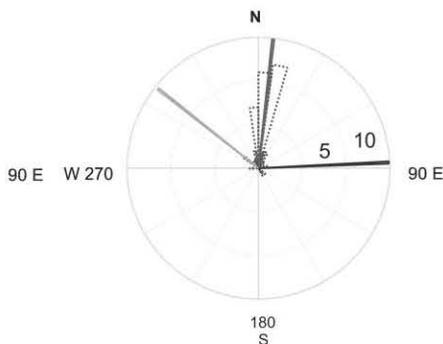
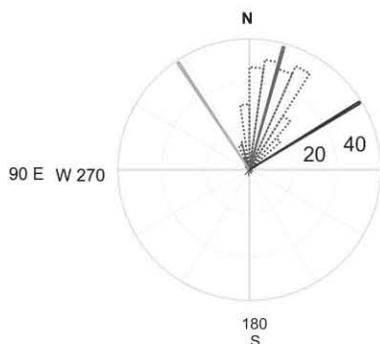
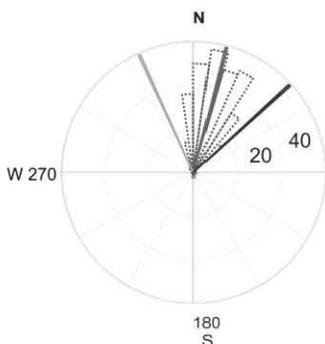
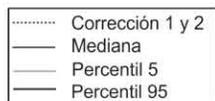
Época II	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-55.5	6.0	33.5
POR II	-59.5	7.8	23.7

Cayaco, Guerrero

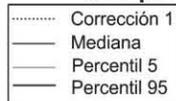
Época I

Fecha: 19/10/2001 - 12/05/2007
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



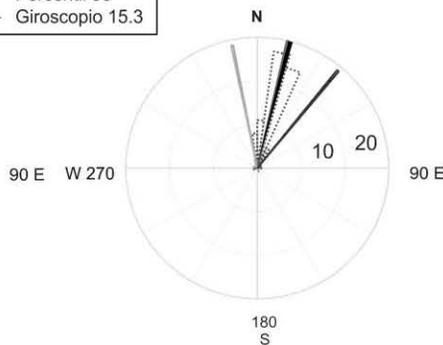
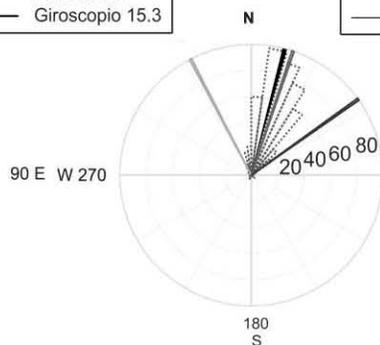
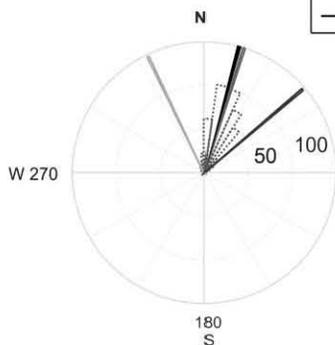
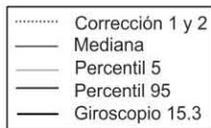
Estimación por medio de Componentes Principales



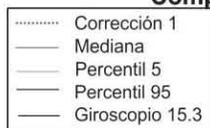
Época II

Fecha: 12/05/2007 - 06/10/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-52.0	6.3	87.9
POR I	-24.6	14.9	47.2
POR II	-33.8	15.1	58.6

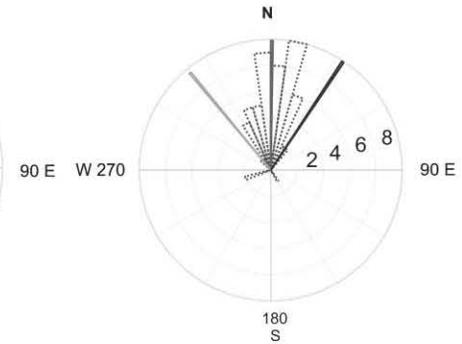
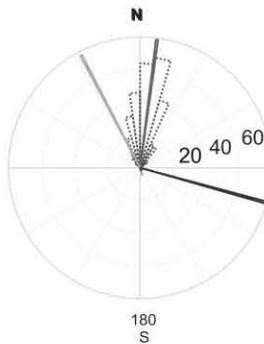
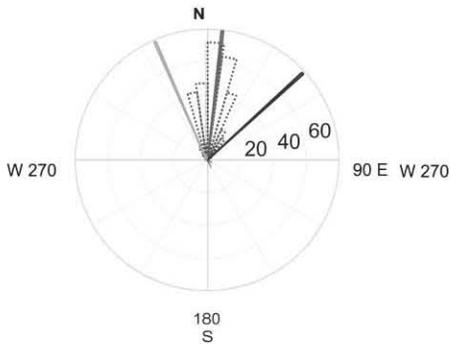
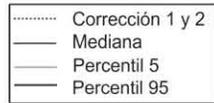
Época II	P5	P50	P95
PCA	-11.2	13.4	39.7
POR I	-25.2	17.9	49.8
POR II	-27.2	18.5	54.5

Comitán, Chiapas

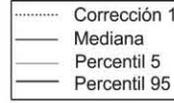
Época I

Fecha: 25/01/2002 - 25/10/2007
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



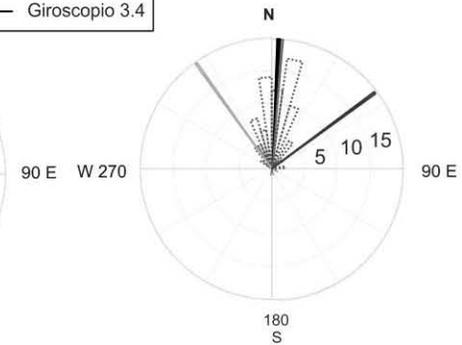
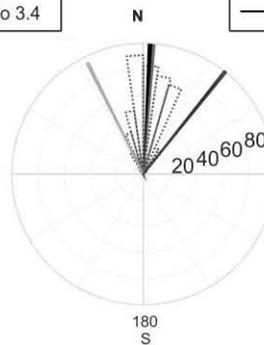
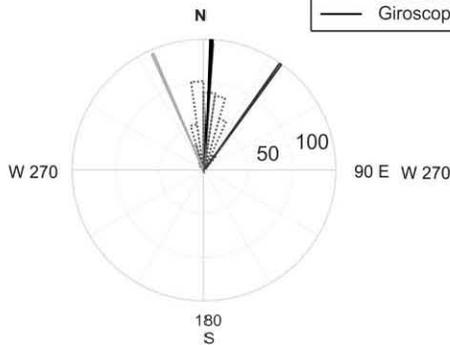
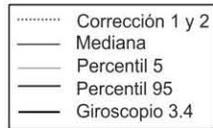
Estimación por medio de Componentes Principales



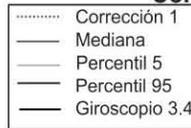
Época II

Fecha: 25/10/2007 - 31/05/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-39.8	0.5	33.7
POR I	-23.9	6.6	47.1
POR II	-27.4	7.5	105.7

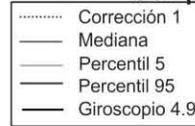
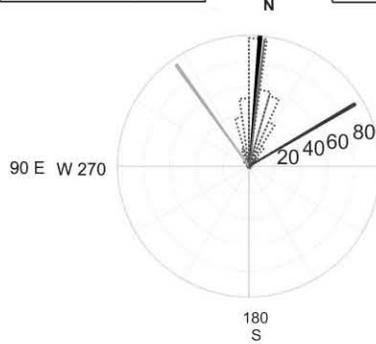
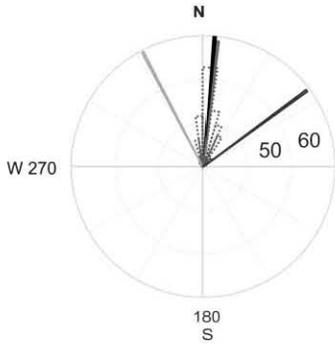
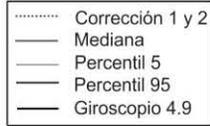
Época II	P5	P50	P95
PCA	-35.8	4.7	53.5
POR I	-23.1	3.5	35.8
POR II	-26.6	4.1	38.9

Casas Grandes, Chihuahua

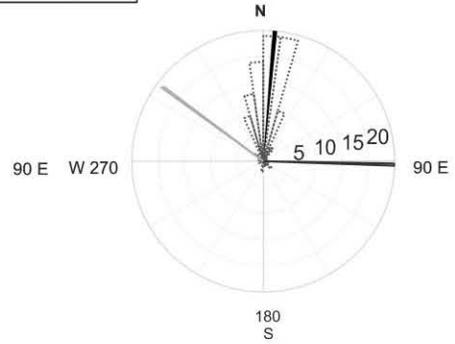
Época I

Fecha: 07/12/2006 - 12/06/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



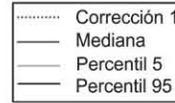
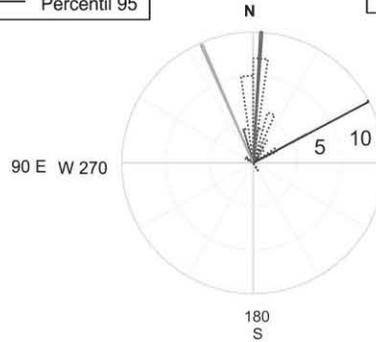
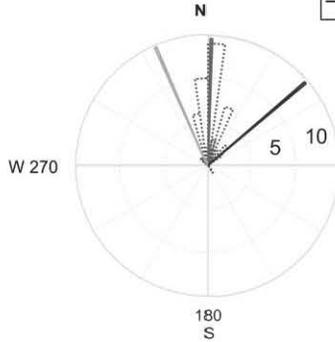
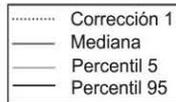
Estimación por medio de Componentes Principales



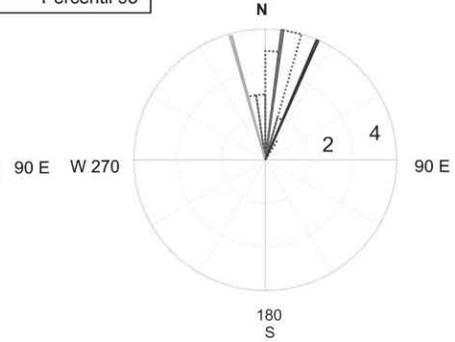
Época II

Fecha: 12/06/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-53.1	4.0	91.9
POR I	-27.2	6.0	53.5
POR II	-35.9	6.5	59.2

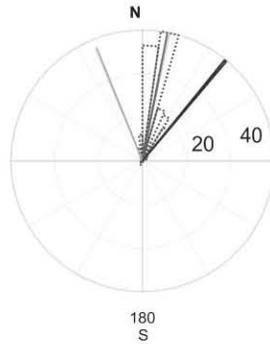
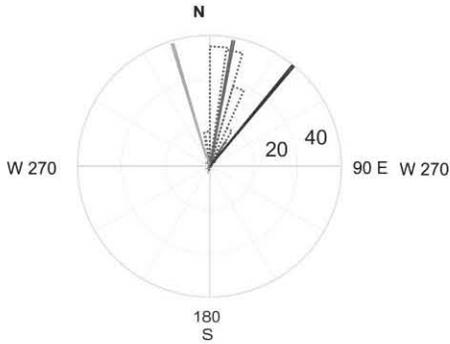
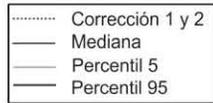
Época II	P5	P50	P95
PCA	-15.2	7.6	21.7
POR I	-23.7	1.9	49.8
POR II	-23.0	3.9	61.9

Chamela, Jalisco

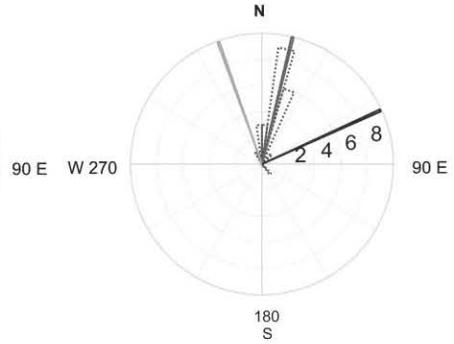
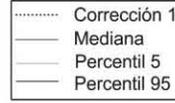
Época I

Fecha: 03/11/2004 - 24/09/2011
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



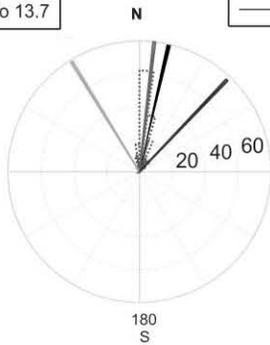
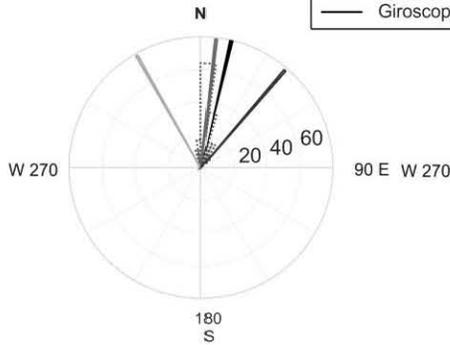
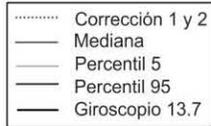
Estimación por medio de Componentes Principales



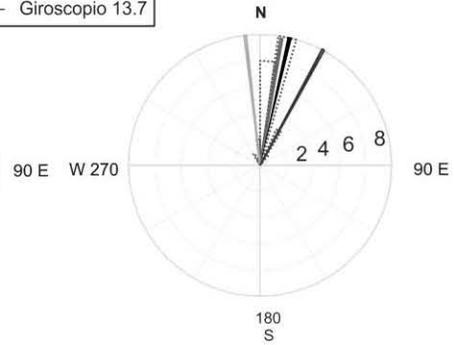
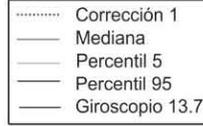
Época II

Fecha: 24/09/2011 - 16/12/2015
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-19.5	13.5	65.6
POR I	-16.2	10.5	39.7
POR II	-22.7	11.0	39.5

Época II	P5	P50	P95
PCA	-6.7	9.6	28.1
POR I	-29.8	6.5	40.9
POR II	-31.4	7.0	43.9

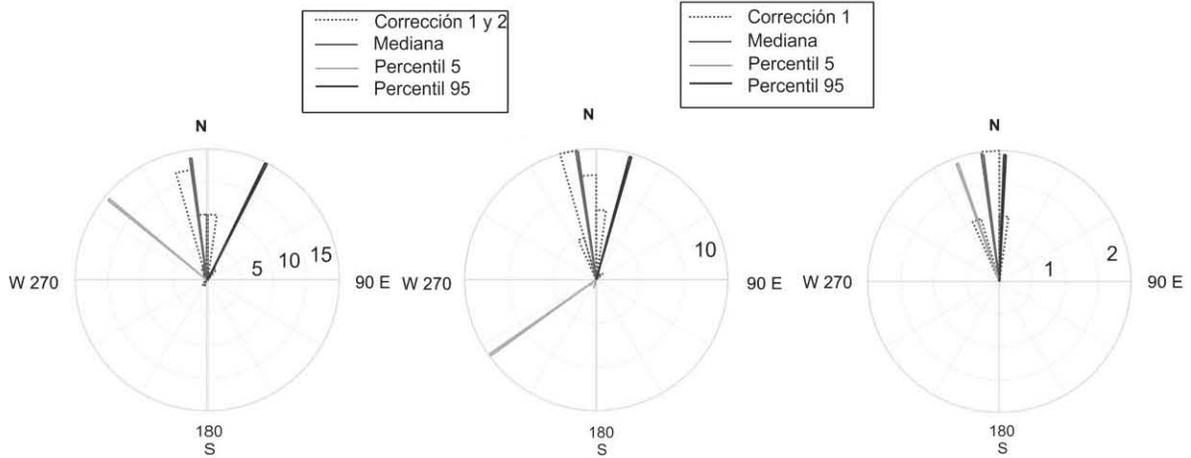
Chamela, Jalisco

Época III

Fecha: 16/12/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh

Estimación por medio de Componentes Principales



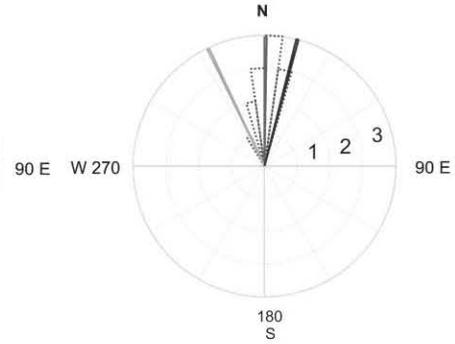
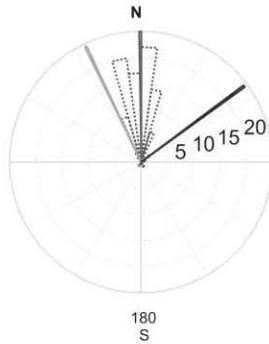
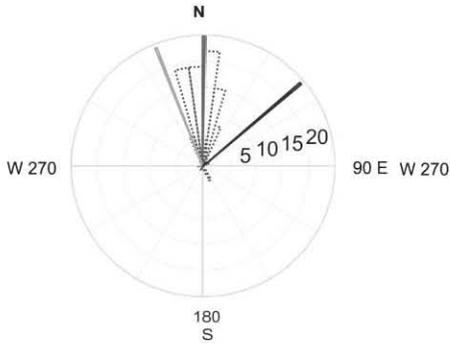
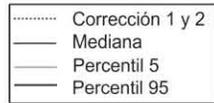
Época III	P5	P50	P95
PCA	-19.1	-7.4	2.7
POR I	50.8	-7.8	26.0
POR II	-125.3	-8.0	15.6

Matías Romero, Oaxaca

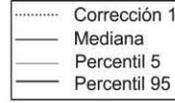
Época I

Fecha: 26/03/2002 - 08/07/2003
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



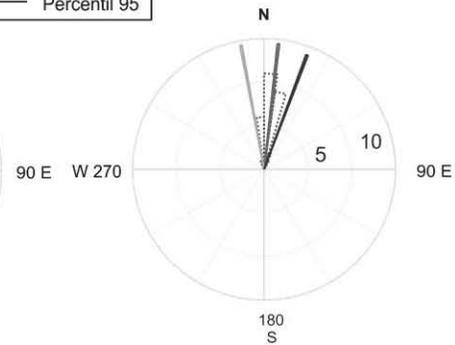
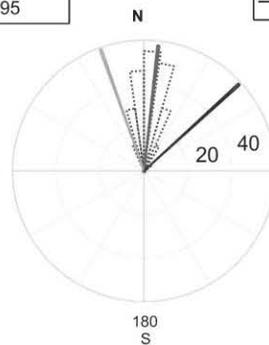
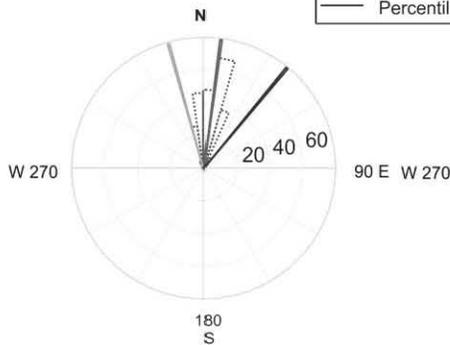
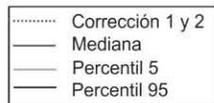
Estimación por medio de Componentes Principales



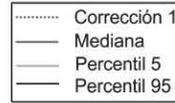
Época II

Fecha: 08/07/2003 - 25/09/2007
 Digitalizador : Europa-T
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-25.0	0.9	14.2
POR I	-21.9	0.8	39.3
POR II	-25.3	-0.2	35.3

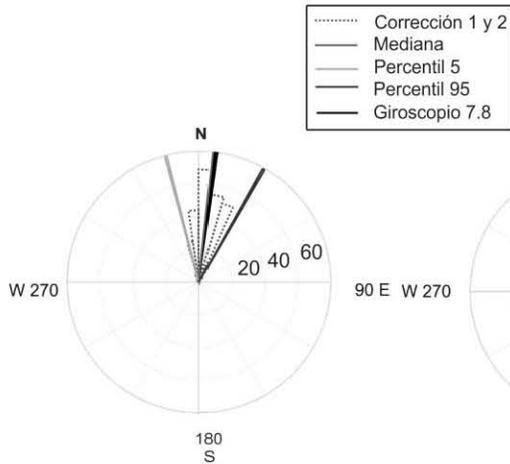
Época II	P5	P50	P95
PCA	-10.9	6.3	20.6
POR I	-15.3	6.8	28.6
POR II	-19.3	6.7	29.4

Matías Romero, Oaxaca

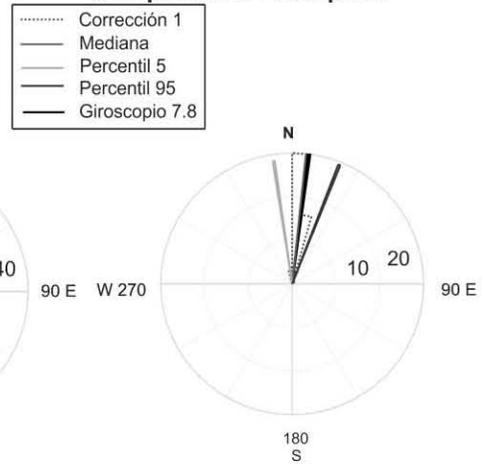
Época III

Fecha: 25/09/2007 - 18/08/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



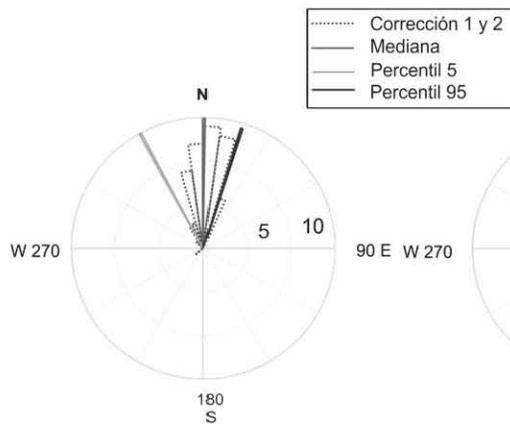
Estimación por medio de Componentes Principales



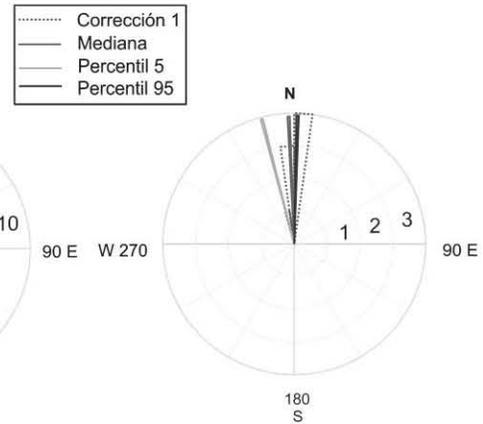
Época IV

Fecha: 18/08/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2.5 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época III	P5	P50	P95
PCA	-8.2	6.5	21.1
POR I	-14.2	6.8	29.9
POR II	-16.8	6.7	33.6

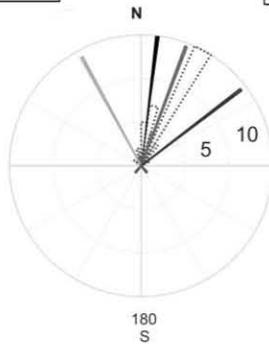
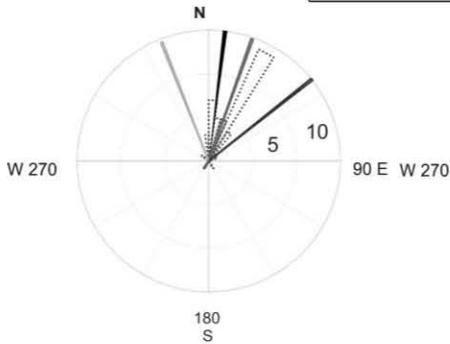
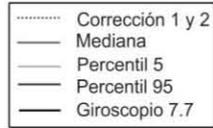
Época IV	P5	P50	P95
PCA	-14.1	-2.2	1.2
POR I	-29.0	0.5	17.3
POR II	-34.0	0.0	18.1

Cruz Grande, Guerrero

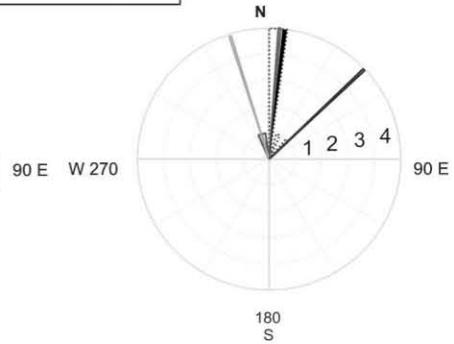
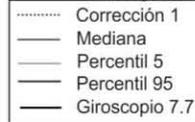
Época I

Fecha: 23/03/2014 - 02/12/2015
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



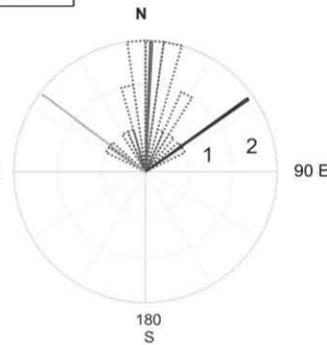
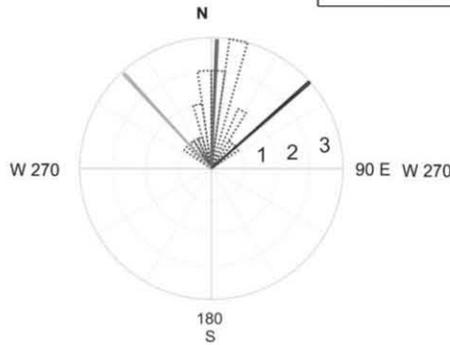
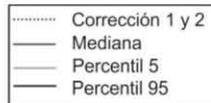
Estimación por medio de Componentes Principales



Época II

Fecha: 02/12/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Época I	P5	P50	P95
PCA	-19.34	6.41	29.44
POR I	7.15	13.8	36.3
POR II	7.2	14.4	38.6

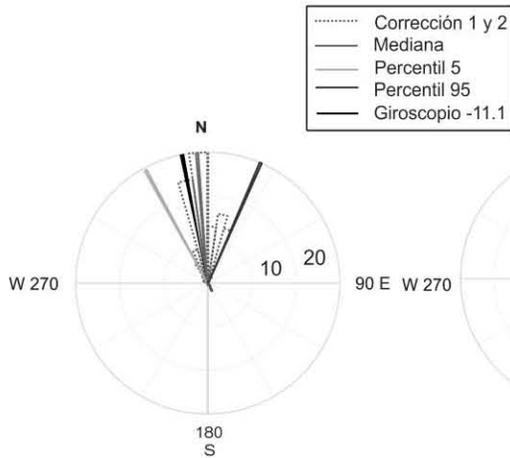
Época II	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-42.8	2.1	48.8
POR II	-53.8	2.5	54.8

Choix, Sinaloa

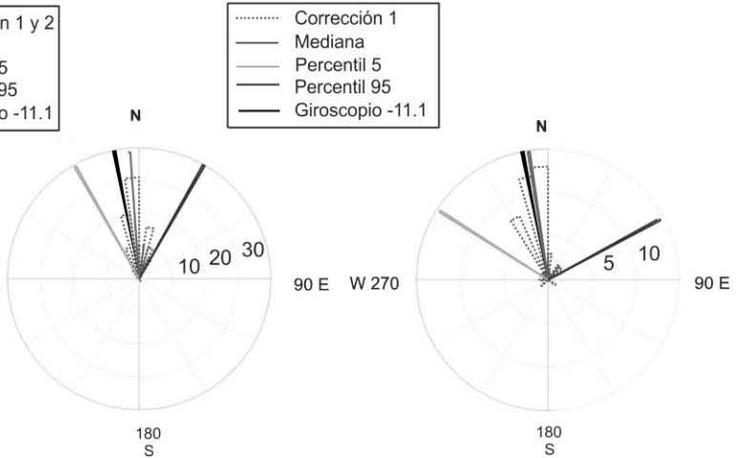
Época I

Fecha: 29/09/2014 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



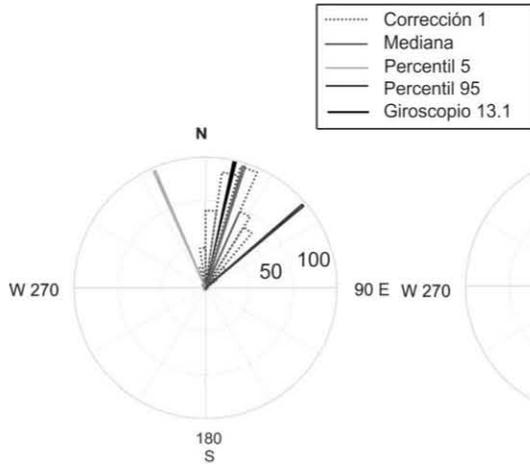
Época I	P5	P50	P95
PCA	-58.0	-8.8	61.8
POR I	-28.9	-4.9	23.3
POR II	-29.7	-4.3	29.7

Ciudad Universitaria, Ciudad de México

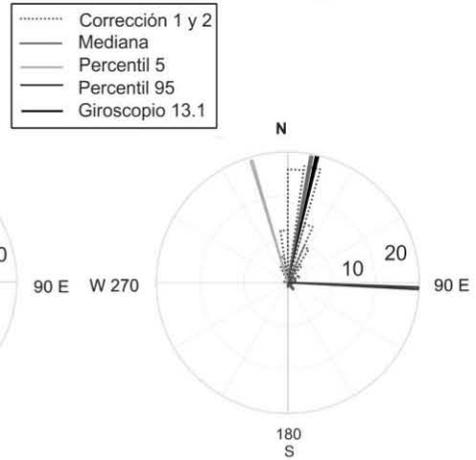
Época I

Fecha: 17/12/2002 - 14/02/2013
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



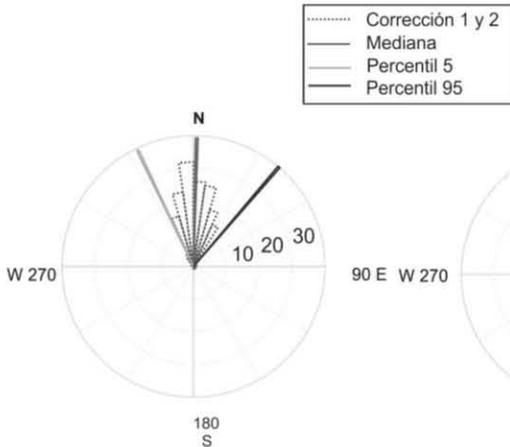
Estimación por medio de Componentes Principales



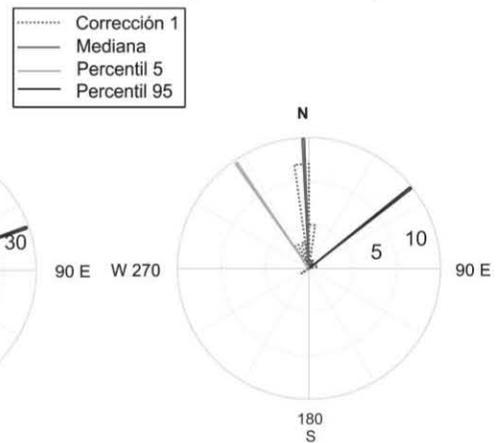
Época II

Fecha: 14/02/2013 - 14/02/2016
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-16.9	10.9	92.5
POR I	-23.8	17.6	49.2
POR II	-28.6	17.5	55.0

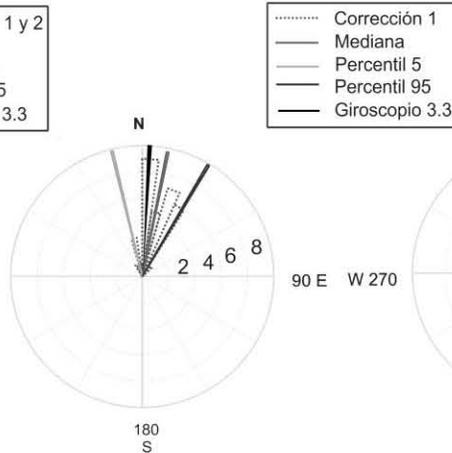
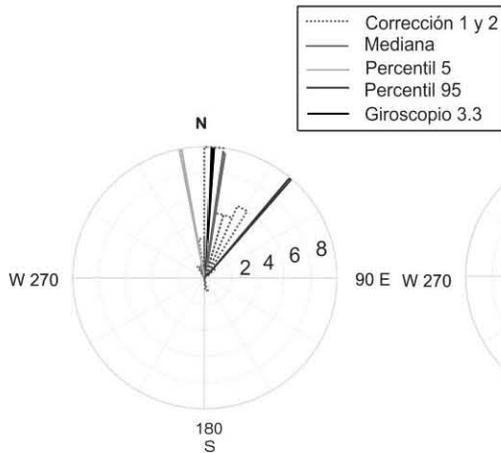
Época II	P5	P50	P95
PCA	-34.6	-2.7	51.8
POR I	-25.7	1.8	40.9
POR II	-26.7	3.8	70.6

Dos Arroyos, Oaxaca

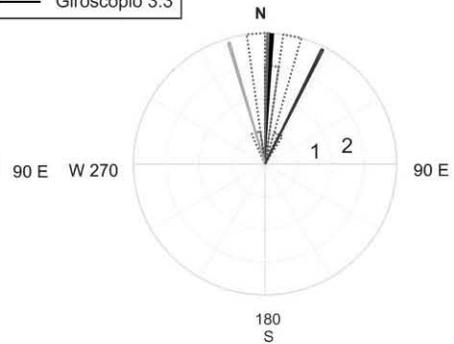
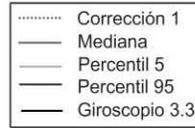
Época I

Fecha: 20/04/2015 - 04/10/2015
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



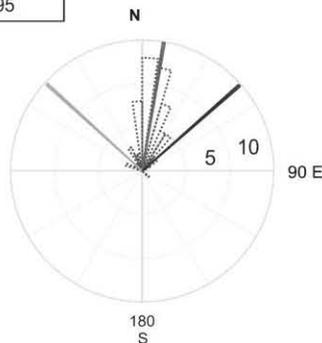
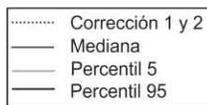
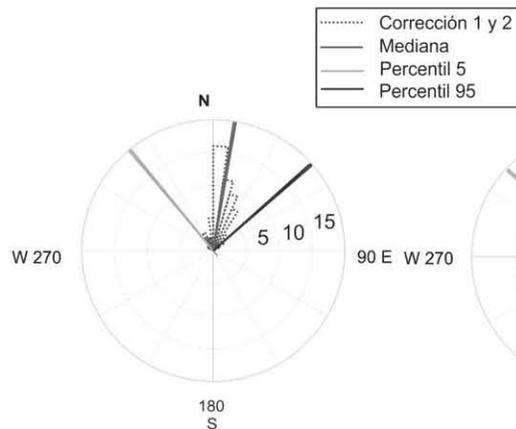
Estimación por medio de Componentes Principales



Época II

Fecha: 04/10/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Época I	P5	P50	P95
PCA	-16.4	1.4	26.4
POR I	-10.4	8.2	40.8
POR II	-13.9	11.0	30.7

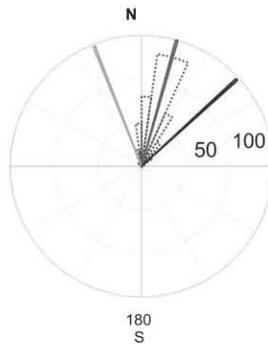
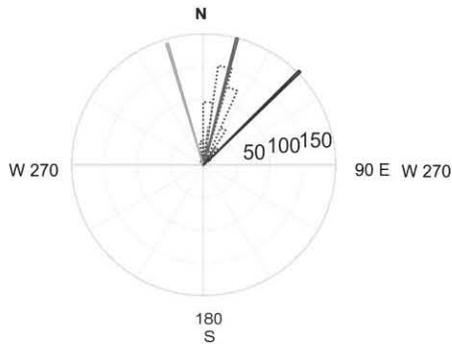
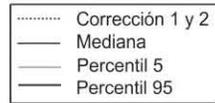
Época II	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-39.3	9.6	48.2
POR II	-47.2	9.9	48.4

Demacú, Hidalgo

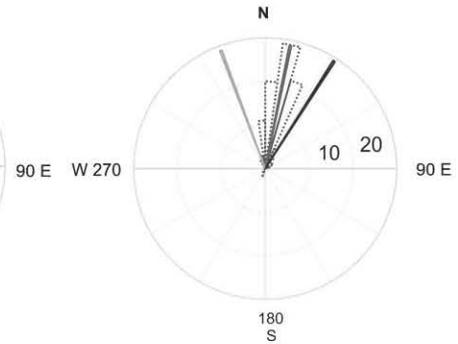
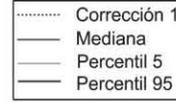
Época I

Fecha: 16/10/2003 - 14/05/2015
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



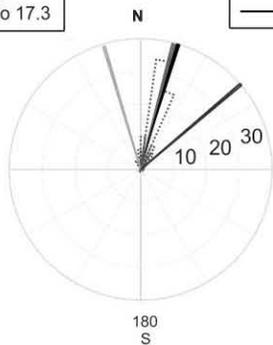
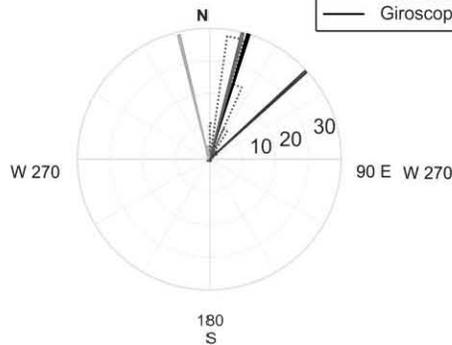
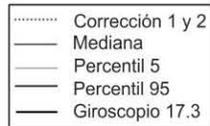
Estimación por medio de Componentes Principales



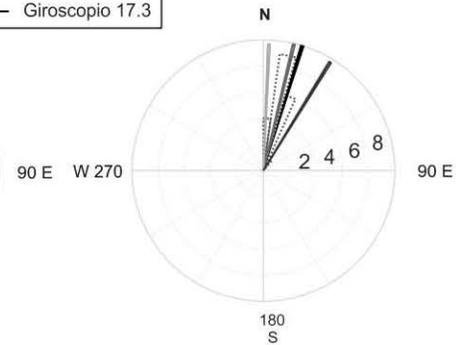
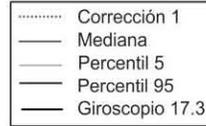
Época II

Fecha: 14/05/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-20.6	11.4	45.8
POR I	-12.5	14.3	47.9
POR II	-13.5	15.1	32.6

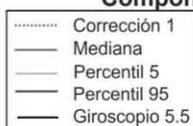
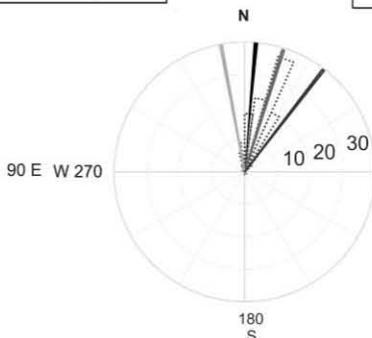
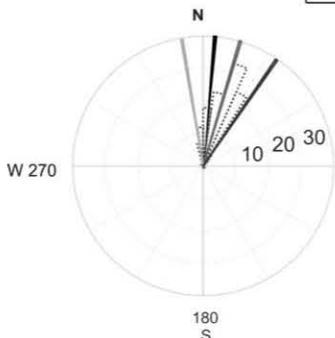
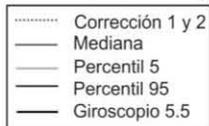
Época II	P5	P50	P95
PCA	2.6	13.7	31.3
POR I	-13.1	14.1	47.5
POR II	-16.8	14.2	49.8

Fresnillo de Trujano, Oaxaca

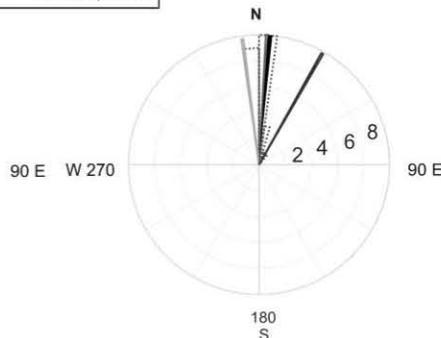
Época I

Fecha: 31/08/2012 - 04/08/2015
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : Trillium 120PA

Estimación por medio de ondas Rayleigh



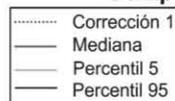
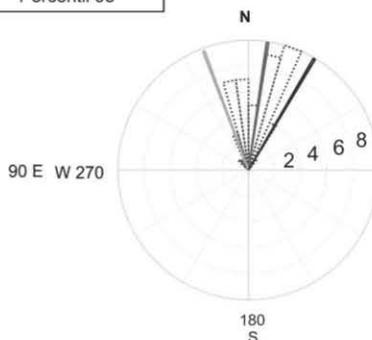
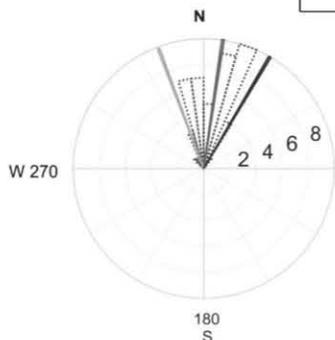
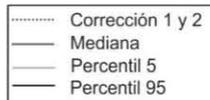
Estimación por medio de Componentes Principales



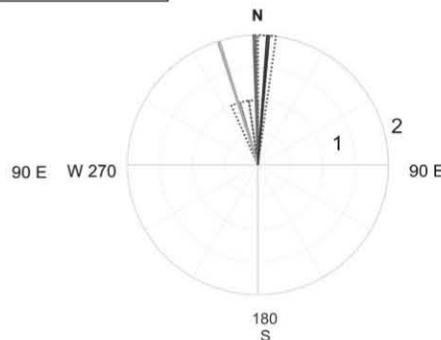
Época II

Fecha: 04/08/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : Trillium 120PA

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-7.8	3.11	29.9
POR I	-9.4	16.7	34.7
POR II	-10.9	17.1	37.7

Época II	P5	P50	P95
PCA	-17.4	-1.0	4.1
POR I	30.6	8.2	30.6
POR II	35.1	9.1	35.1

Gómez Farías, Tamaulipas

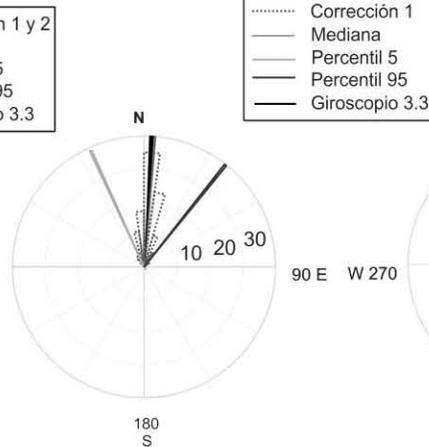
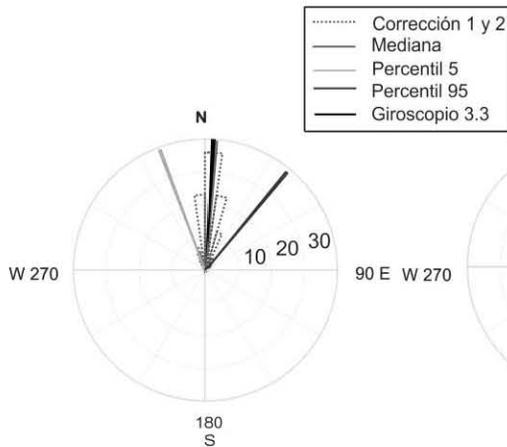
Época I

Fecha: 19/05/2014 - 09/03/2016

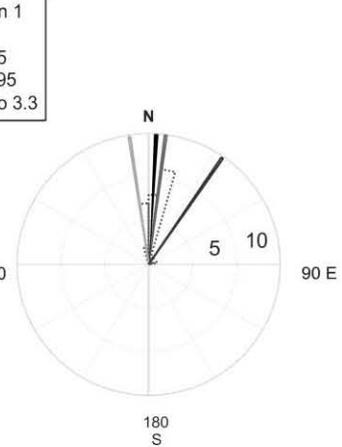
Digitalizador : Q330S+

Sensor de velocidad : PBB-200S

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



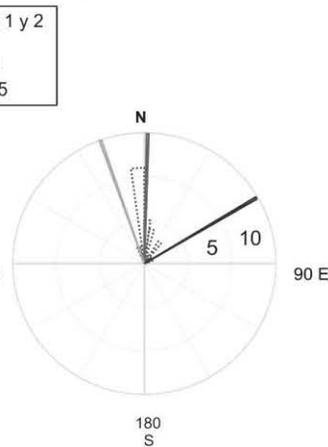
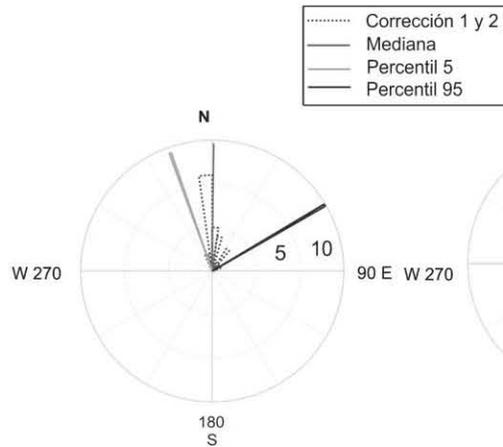
Época II

Fecha: 09/03/2016 - 13/07/2016

Digitalizador : Q330S+

Sensor de velocidad : PBB-200S

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Época I	P5	P50	P95
PCA	-8.2	7.1	34.2
POR I	-20.1	4.4	39.0
POR II	-24.9	4.5	38.5

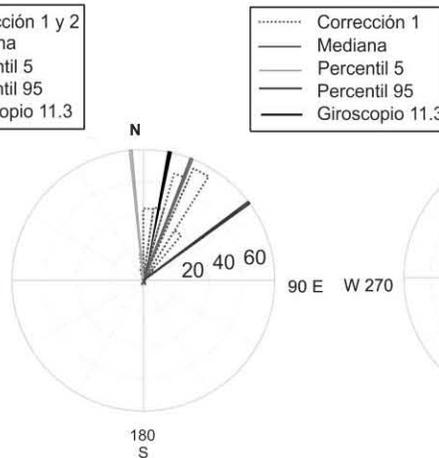
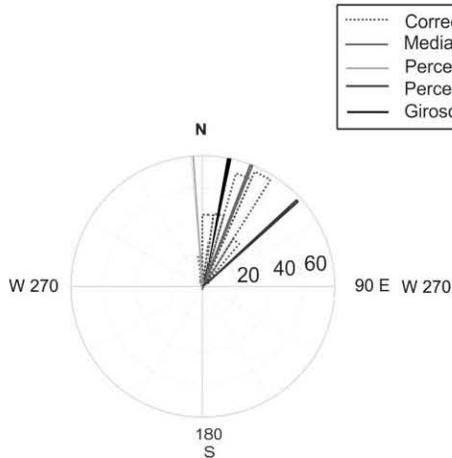
Época II	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-19.9	1.7	59.7
POR II	-19.6	2.7	54.4

Huajuapán de León, Oaxaca

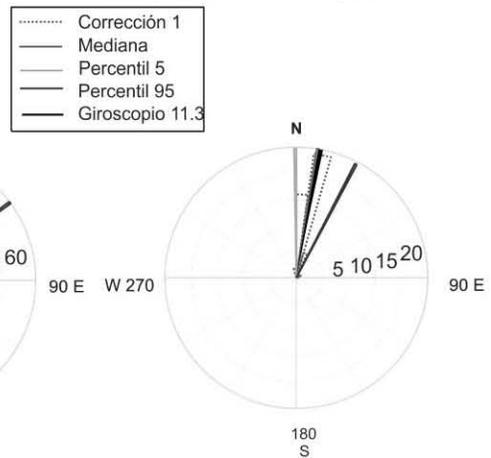
Época I

Fecha: 08/12/2009 - 04/08/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



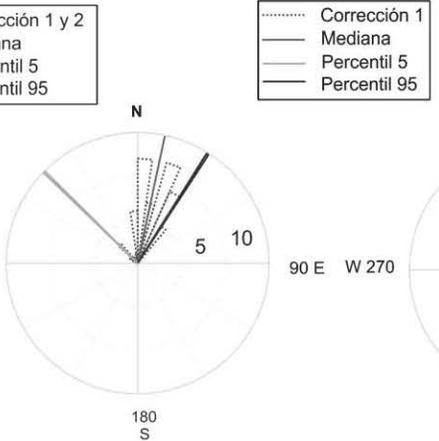
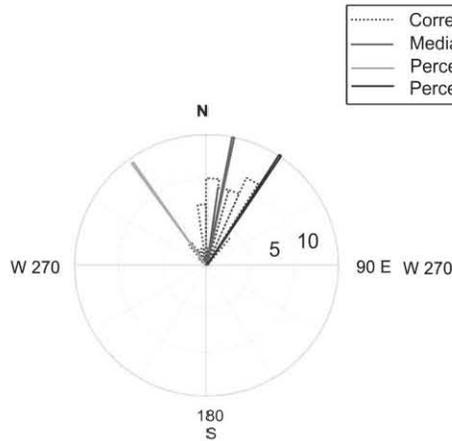
Estimación por medio de Componentes Principales



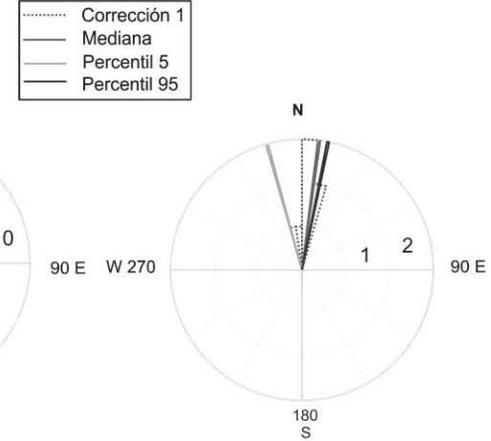
Época II

Fecha: 10/06/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-0.6	9.2	27.3
POR I	-5.0	21.5	47.7
POR II	-5.3	21.8	53.1

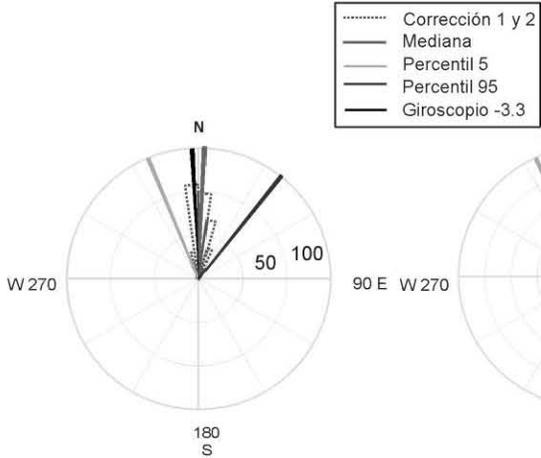
Época II	P5	P50	P95
PCA	-16.0	7.1	11.8
POR I	-35.4	11.6	33.3
POR II	-45.6	12.3	32.2

Hidalgo del Parral, Chihuahua

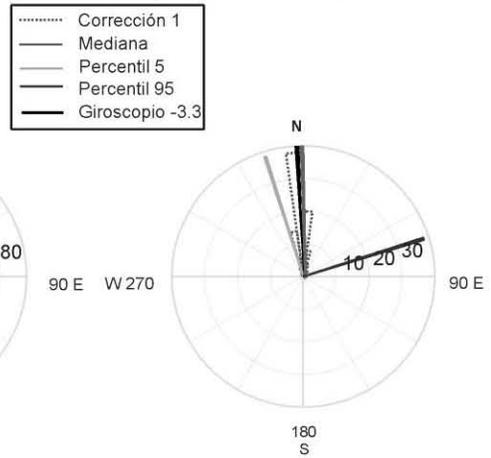
Época I

Fecha: 30/12/2006 - 10/06/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



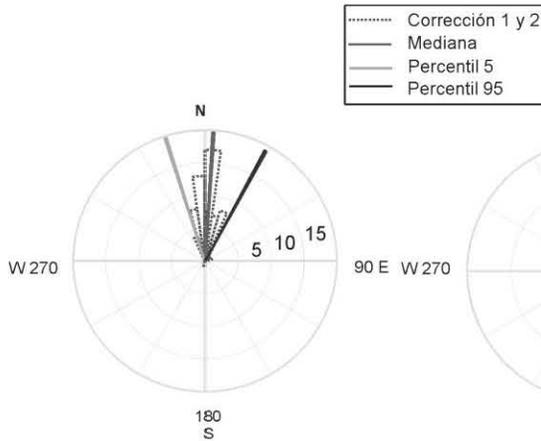
Estimación por medio de Componentes Principales



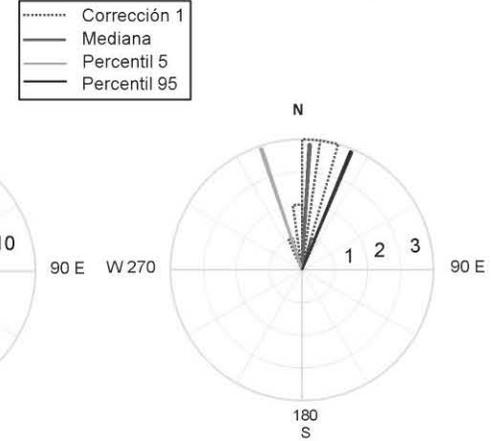
Época II

Fecha: 10/06/2016 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-17.4	-1.2	72.0
POR I	-22.3	2.6	38.6
POR II	-24.8	2.4	37.4

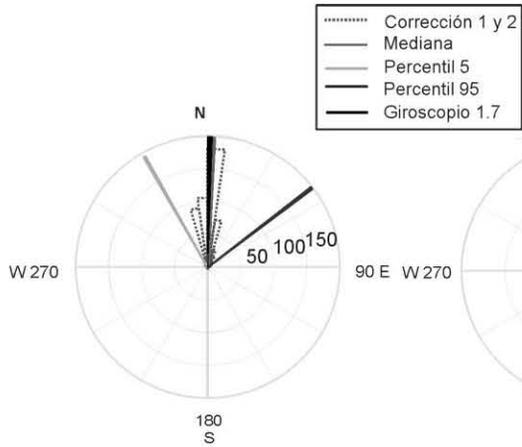
Época II	P5	P50	P95
PCA	-18.6	3.9	22.3
POR I	-17.4	3.1	28.4
POR II	-23.2	3.1	29.6

Hermosillo, Sonora

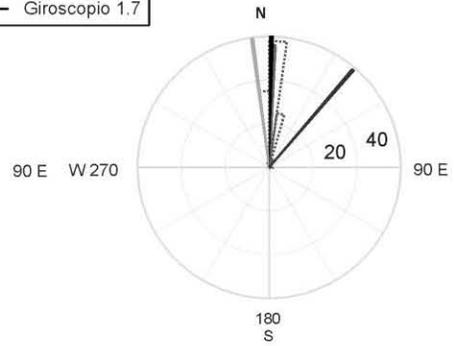
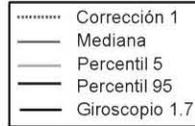
Época I

Fecha: 18/06/2007 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



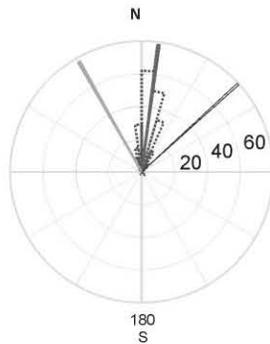
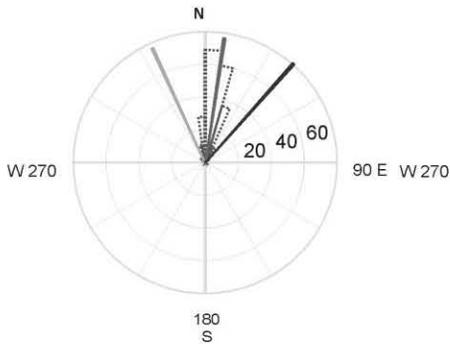
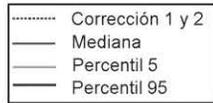
Época I	P5	P50	P95
PCA	-7.0	2.0	40.5
POR I	-29.5	2.0	52.5
POR II	-28.2	2.1	71.7

Huatulco, Oaxaca

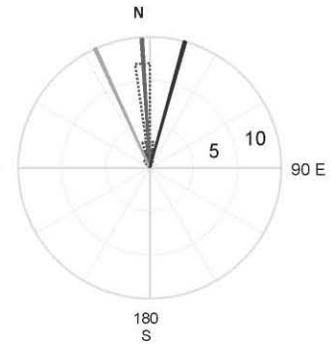
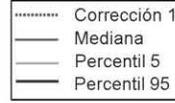
Época I

Fecha: 25/06/2004 - 29/11/2007
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



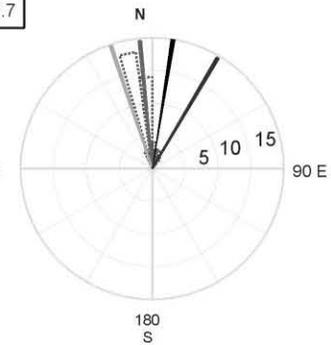
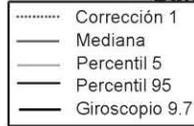
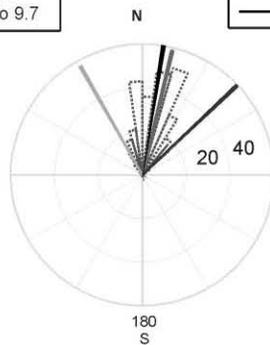
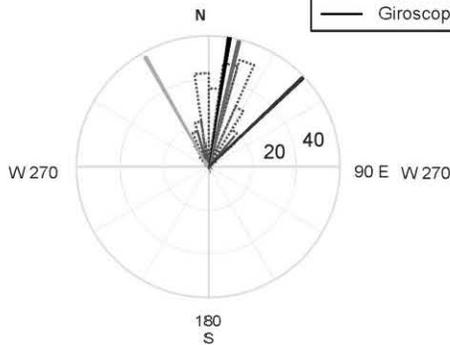
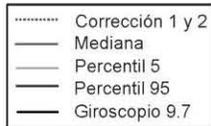
Estimación por medio de Componentes Principales



Época II

Fecha: 29/11/2007 - 31/03/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Época I	P5	P50	P95
PCA	-24.0	-5.6	15.6
POR I	-23.7	5.3	32.3
POR II	-29.3	3.6	31.3

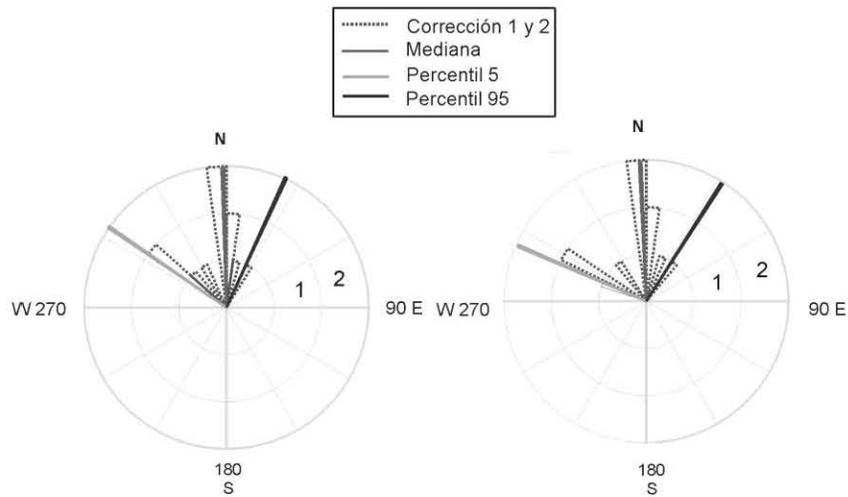
Época II	P5	P50	P95
PCA	-18.4	-5.6	21.7
POR I	-23.7	13.8	44.9
POR II	-29.3	13.1	46.9

Huatulco, Oaxaca

Época III

Fecha: 31/03/2016 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



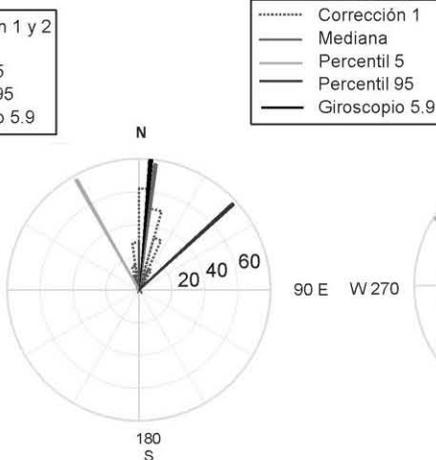
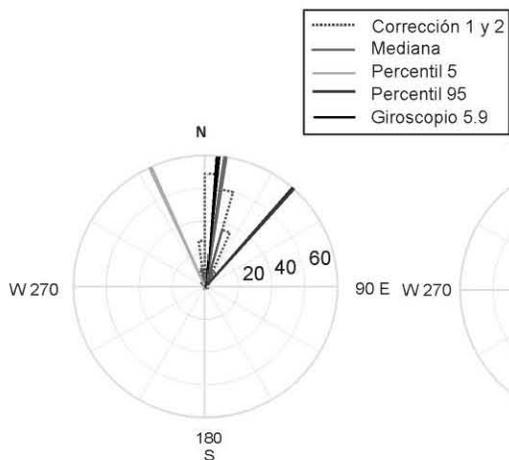
Época I	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-55.6	1.5	24.7
POR II	-66.6	2.5	32.6

Irapuato, Guanajuato

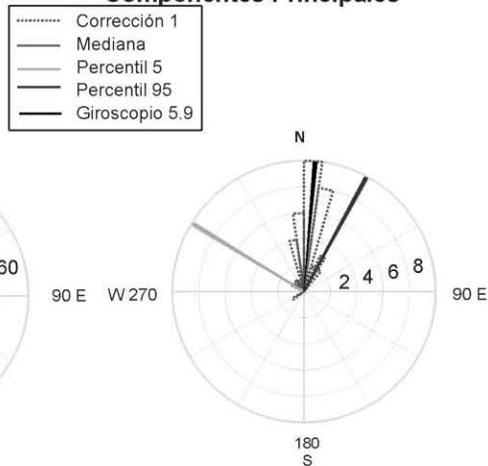
Época I

Fecha: 27/03/2009 - 16/06/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



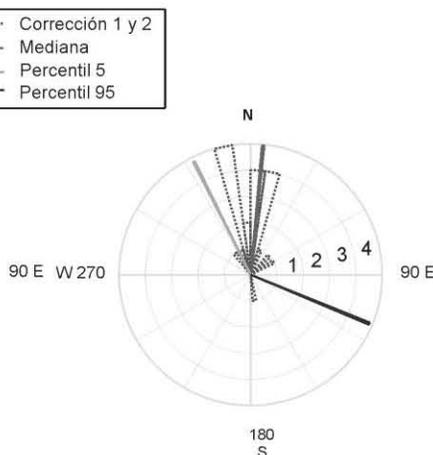
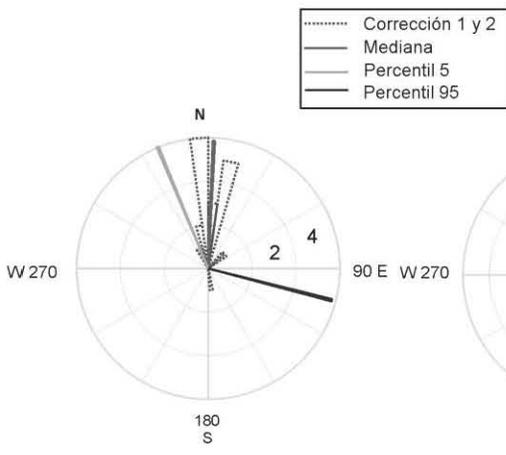
Estimación por medio de Componentes Principales



Época II

Fecha: 16/06/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Época I	P5	P50	P95
PCA	-58.8	4.7	28.8
POR I	-24.7	8.0	41.4
POR II	-29.3	7.0	47.8

Época II	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-22.9	2.6	104.6
POR II	-26.1	5.3	112.5

Juriquilla, Queretaro

Época I

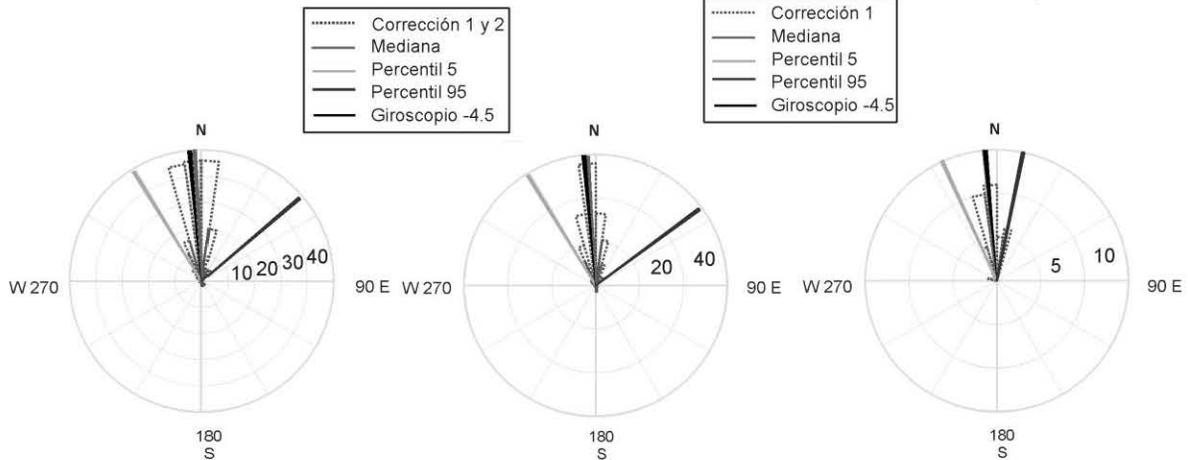
Fecha: 30/10/2010 - 17/11/2015

Digitalizador : Q330S

Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh

Estimación por medio de Componentes Principales



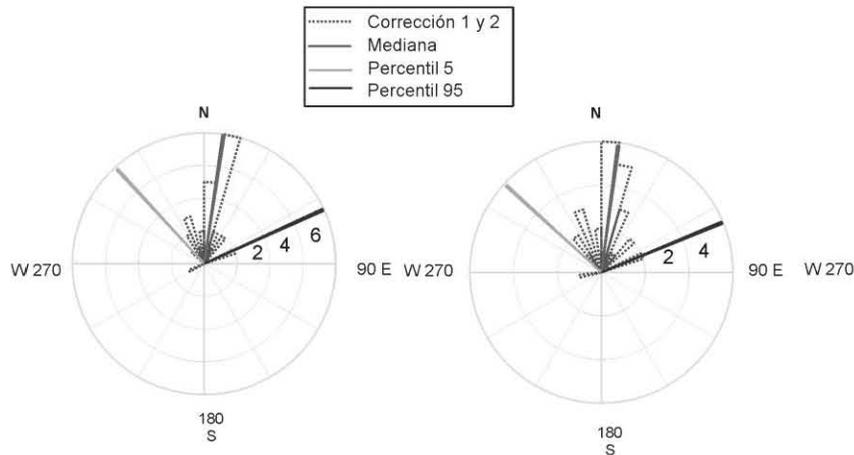
Época II

Fecha: 17/11/2015 - 13/07/2016

Digitalizador : Q330S

Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Época I	P5	P50	P95
PCA	-24.2	-5.4	11.3
POR I	-31.2	-3.9	49.1
POR II	-31.2	-3.0	53.5

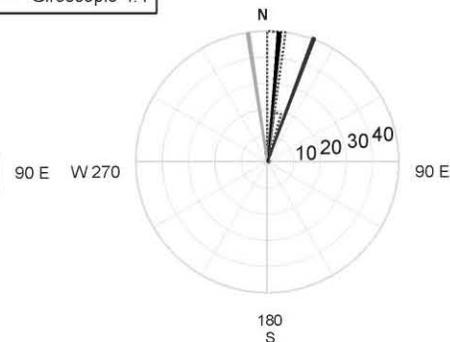
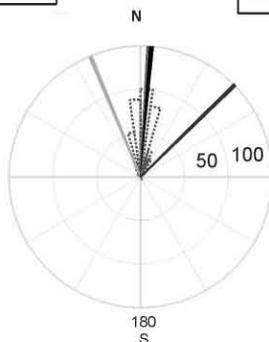
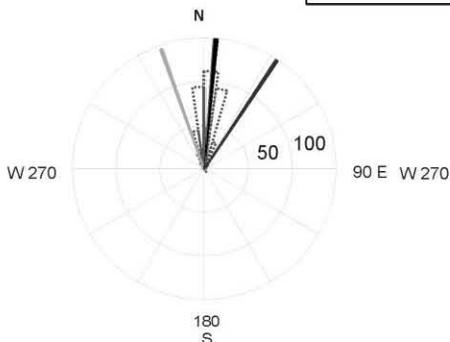
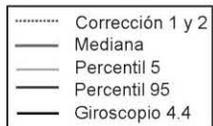
Época II	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-42.9	8.2	65.3
POR II	-47.9	7.2	67.3

Linares, Nuevo León

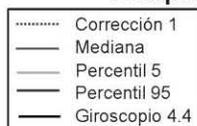
Época I

Fecha: 30/10/2010 - 11/11/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



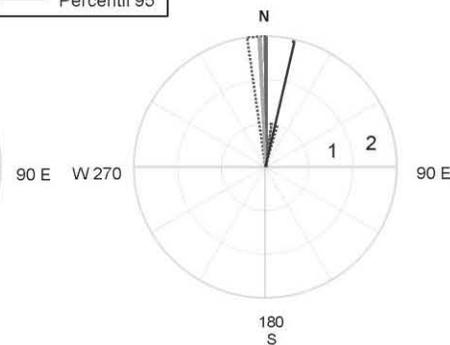
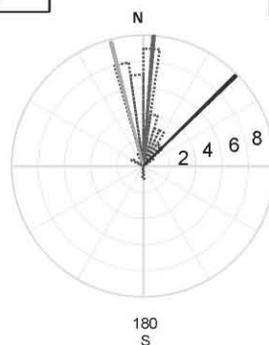
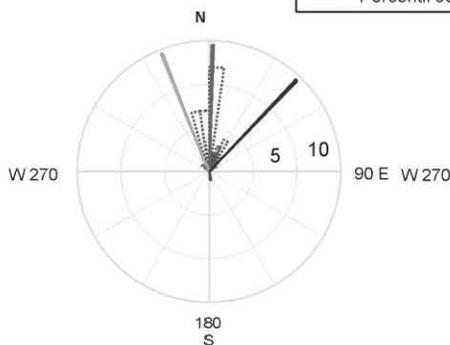
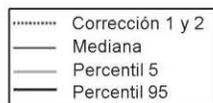
Estimación por medio de Componentes Principales



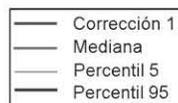
Época II

Fecha: 11/11/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-8.2	5.2	20.6
POR I	-19.2	4.7	33.6
POR II	-22.2	4.0	45.2

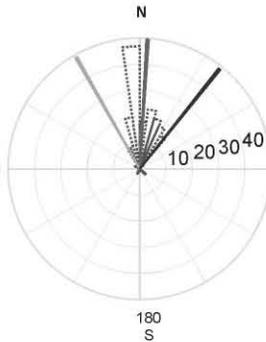
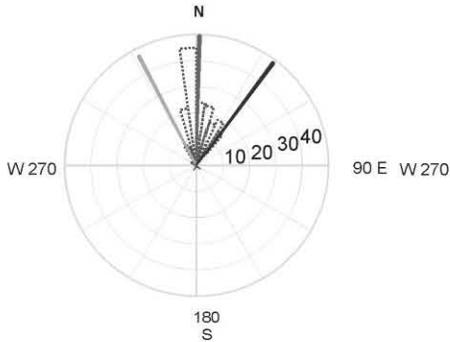
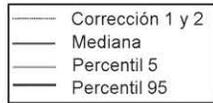
Época II	P5	P50	P95
PCA	-2.9	-0.2	12.5
POR I	-21.06	1.1	36.8
POR II	-15.0	4.1	37.5

La Paz, Baja California Sur

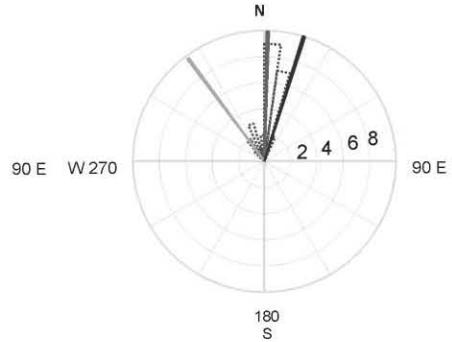
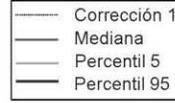
Época I

Fecha: 20/04/2002 - 10/02/2008
 Digitalizador : Q68LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



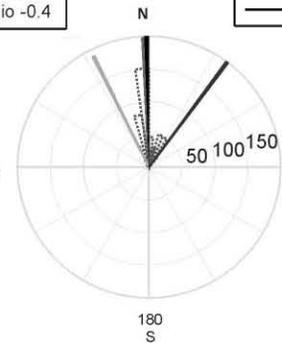
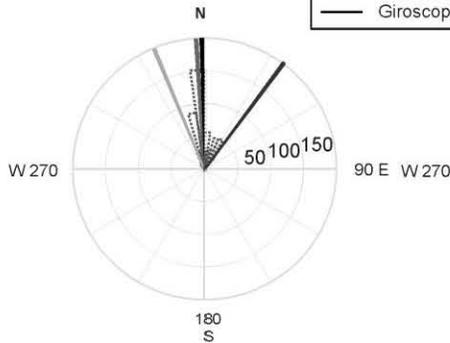
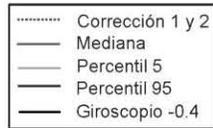
Estimación por medio de Componentes Principales



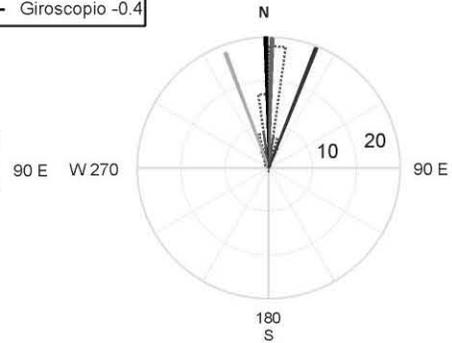
Época II

Fecha: 10/02/2008 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-36.9	1.9	17.7
POR I	-28.0	1.9	36.4
POR II	-29.1	3.5	38.4

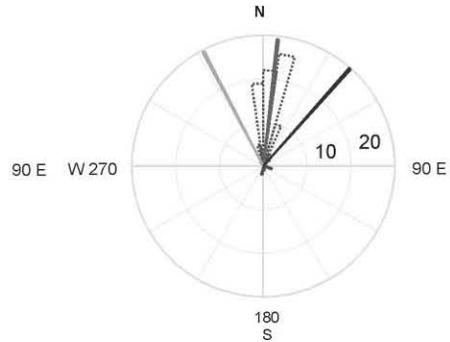
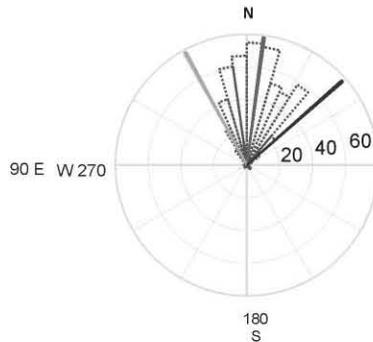
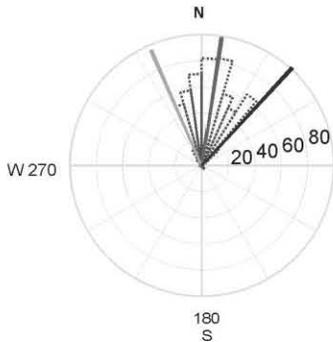
Época II	P5	P50	P95
PCA	-20.4	1.0	21.0
POR I	-23.0	-3.3	36.0
POR II	-26.1	-2.9	36.9

Laguna Verde, Veracruz

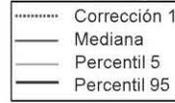
Época I

Fecha: 06/05/2005 - 30/09/2013
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



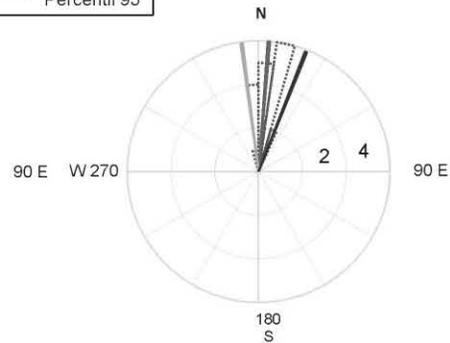
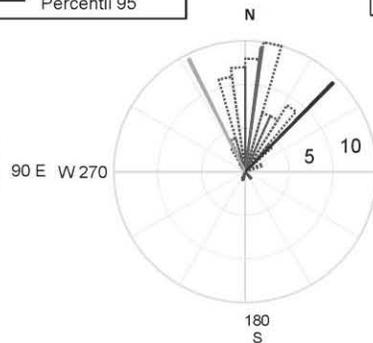
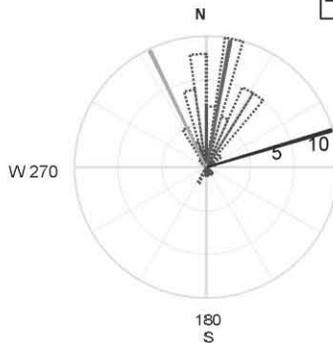
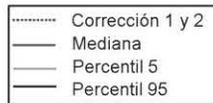
Estimación por medio de Componentes Principales



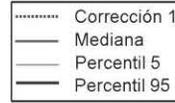
Época II

Fecha: 30/09/2013 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-27.9	6.3	44.1
POR I	-23.8	8.9	33.3
POR II	-28.4	8.6	33.5

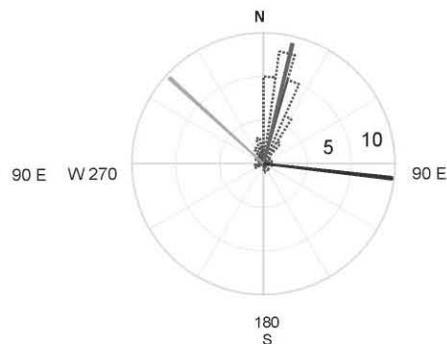
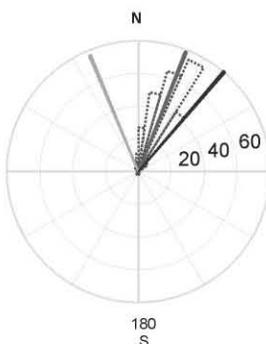
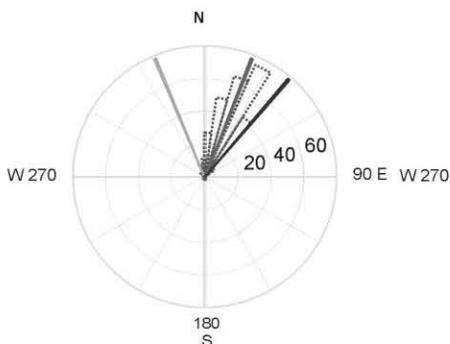
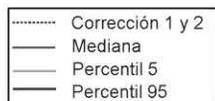
Época II	P5	P50	P95
PCA	-7.4	4.2	21.7
POR I	-26.2	7.8	44.6
POR II	-25.6	10.3	73.2

Mazatlán, Sinaloa

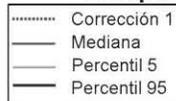
Época I

Fecha: 20/11/2002 - 15/08/2013
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



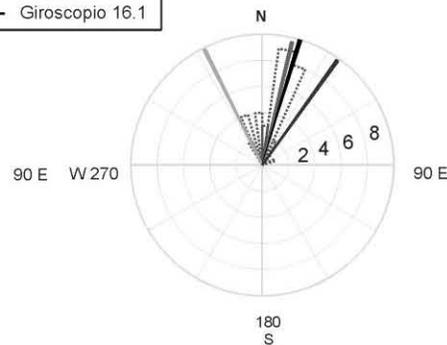
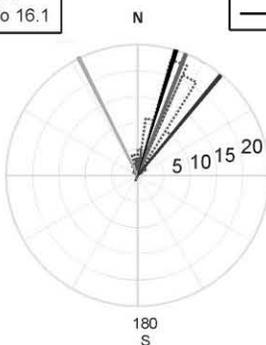
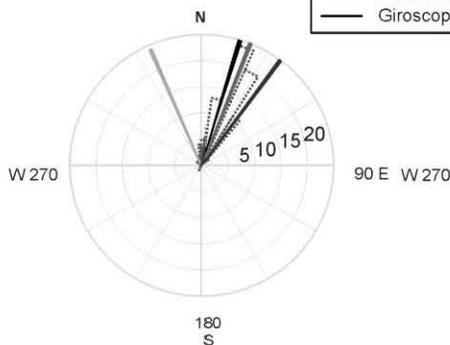
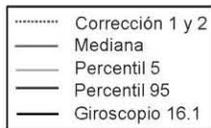
Estimación por medio de Componentes Principales



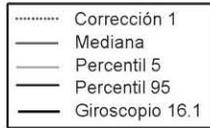
Época II

Fecha: 15/08/2013 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-147.5	13.3	96.5
POR I	-22.2	21.6	40.2
POR II	-26.8	21.7	47.5

Época II	P5	P50	P95
PCA	-26.4	13.03	35.1
POR I	-23.6	21.9	36.0
POR II	-26.5	21.7	39.7

Mexicali, Baja California

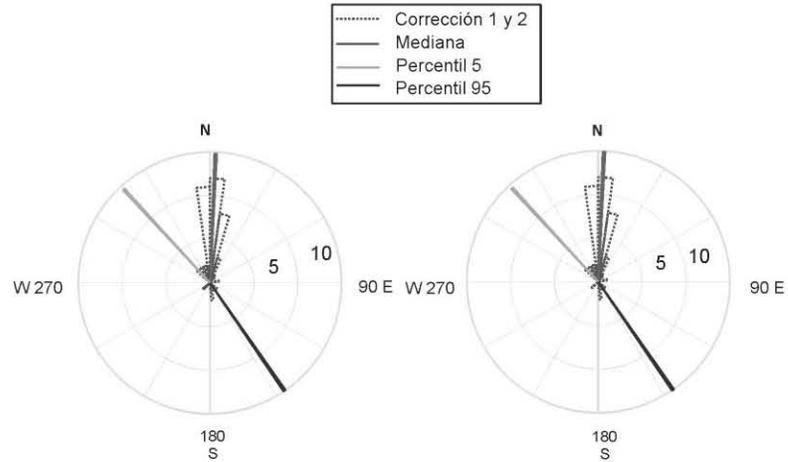
Época I

Fecha: 04/10/2011 - 15/10/2014

Digitalizador : Raftek 130

Sensor de velocidad : CMG-40T

Estimación por medio de ondas Rayleigh



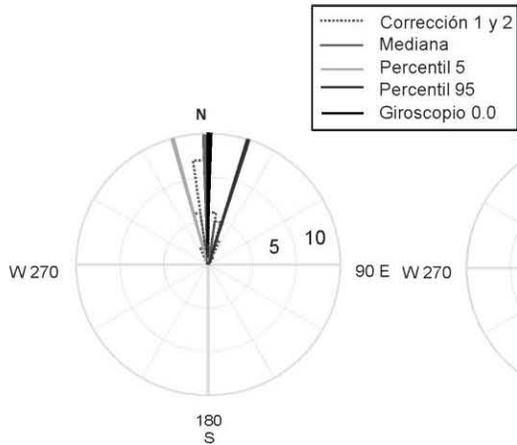
Época II

Fecha: 15/10/2014 - 24/10/2015

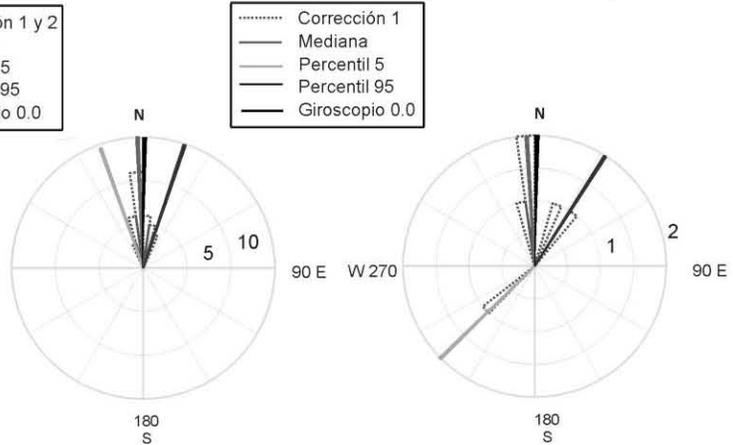
Digitalizador : Q330S+

Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-42.6	2.7	145.1
POR II	-38.4	4.7	145.2

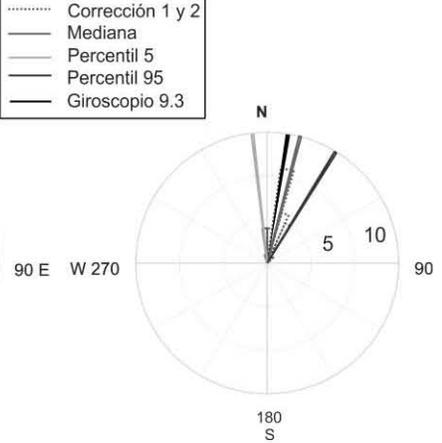
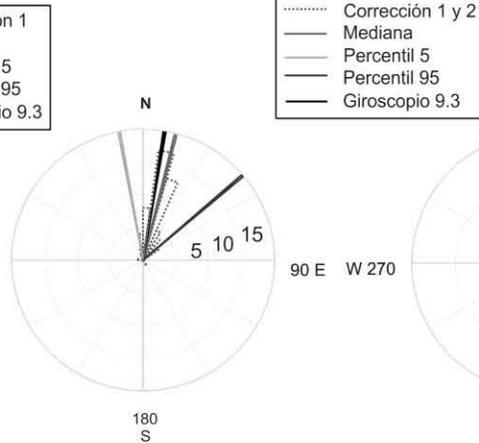
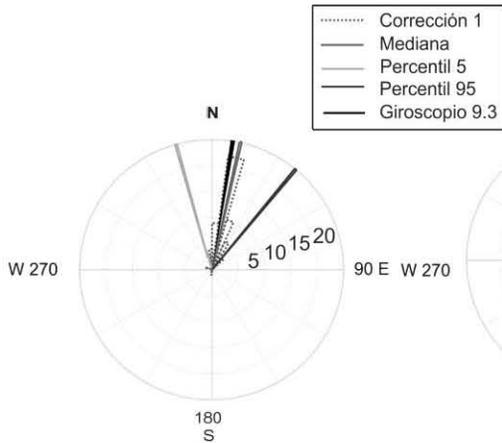
Época II	P5	P50	P95
PCA	-134.3	-3.9	32.6
POR I	-15.3	1.8	17.5
POR II	-19.0	-2.4	18.5

Múzquiz, Chihuahua

Época I

Fecha: 30/10/2010 - 09/10/2014
 Digitalizador : Q680
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh

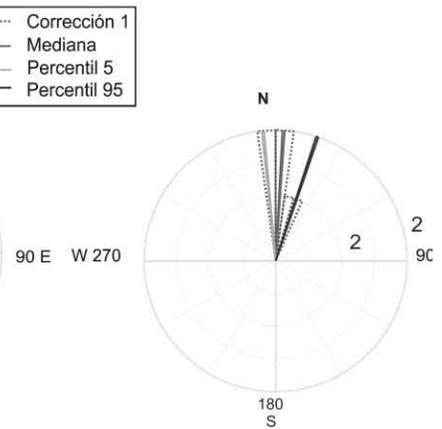
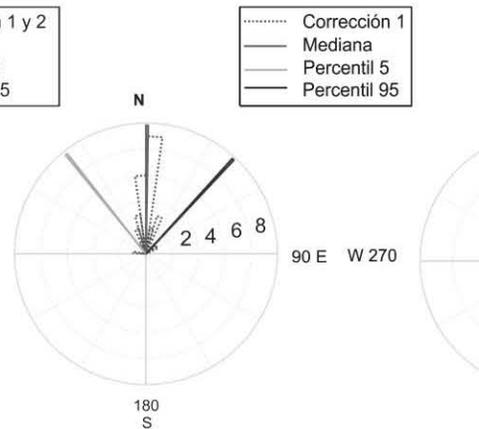
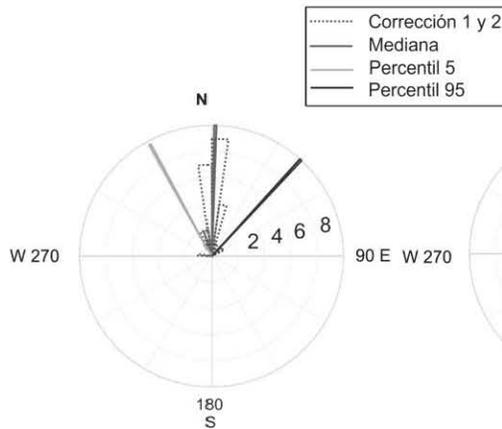


Estimación por medio de Componentes Principales

Época II

Fecha: 30/10/2010 - 09/10/2014
 Digitalizador : Q680
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales

Época I	P5	P50	P95
PCA	-6.76	14.7	31.17
POR I	39.4	12.4	36.3
POR II	49.9	15.1	38.6

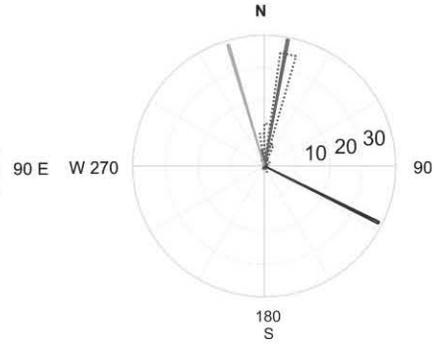
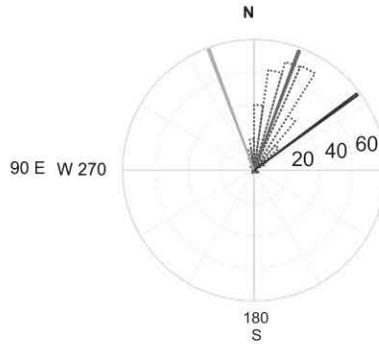
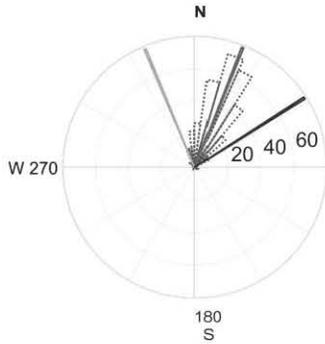
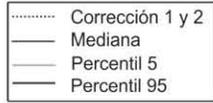
Época II	P5	P50	P95
PCA	-5.4	3.3	18.2
POR I	-170.8	0.4	42.3
POR II	-158.4	-0.11	42.3

Mezcala, Guerrero

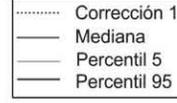
Época I

Fecha: 01/04/2005 - 26/04/2014
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



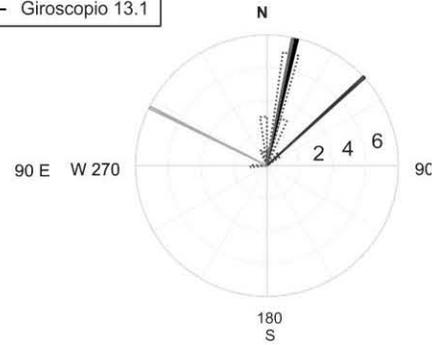
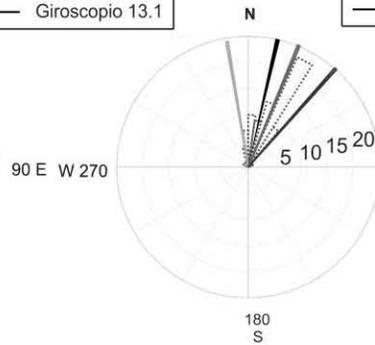
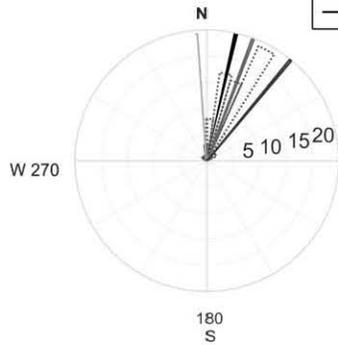
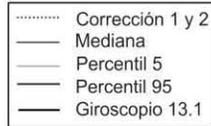
Estimación por medio de Componentes Principales



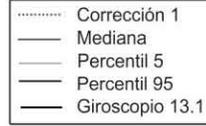
Época II

Fecha: 26/04/2014 - 20/02/2016
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-16.9	10.6	116.7
POR I	-20.1	20.3	53.7
POR II	-22.3	21.1	57.7

Época II	P5	P50	P95
PCA	--63.3	11.4	41.1
POR I	-4.6	21.0	39.9
POR II	-9.8	23.0	41.8

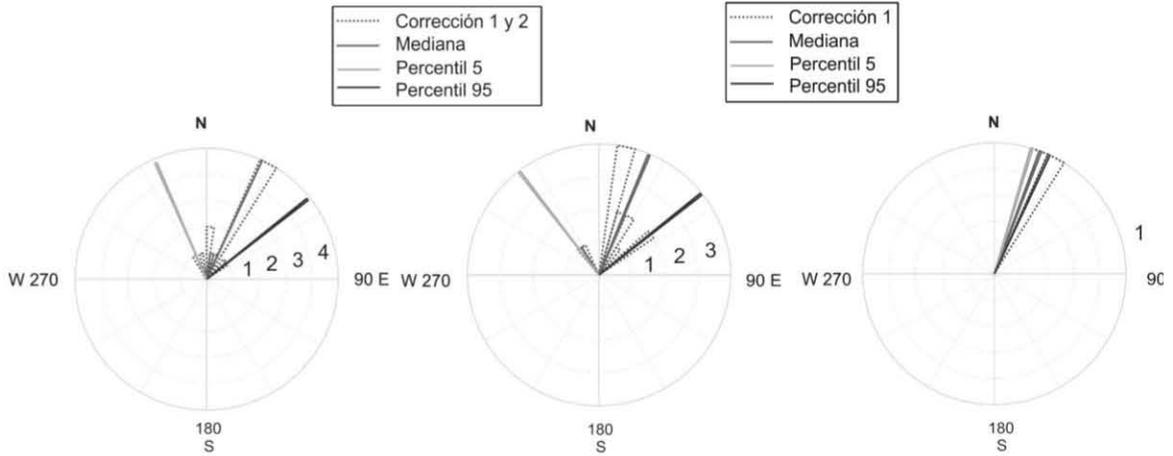
Mezcala, Guerrero

Época III

Fecha: 20/02/2016 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh

Estimación por medio de Componentes Principales



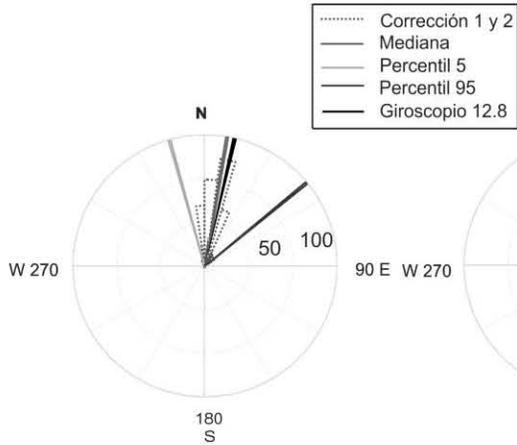
Época I	P5	P50	P95
PCA	16.8	20.7	24.5
POR I	-23.9	24.8	51.3
POR II	-37.3	23.0	51.7

Maruata, Michoacán

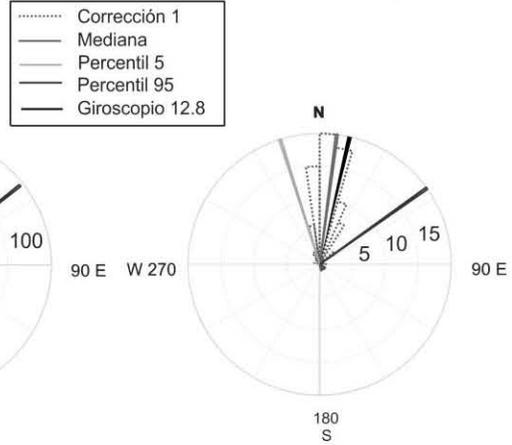
Época I

Fecha: 29/10/2006 - 24/02/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (g3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



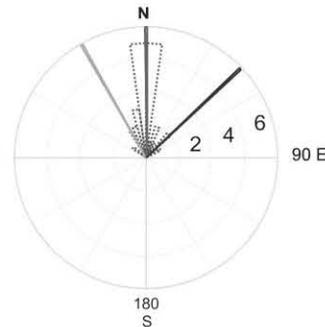
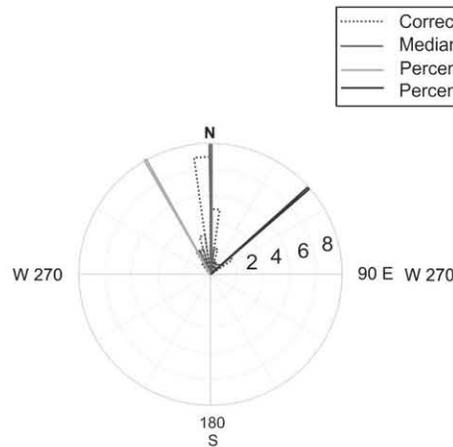
Estimación por medio de Componentes Principales



Época II

Fecha: 24/02/2016 - 13/02/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (g3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Época I	P5	P50	P95
PCA	-17.0	7.8	54.1
POR I	-15.9	9.3	50.1
POR II	-18.4	9.8	51.9

Época II	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-29.2	-0.9	48.3
POR II	-29.9	0.9	46.8

Monterrey, Nuevo León

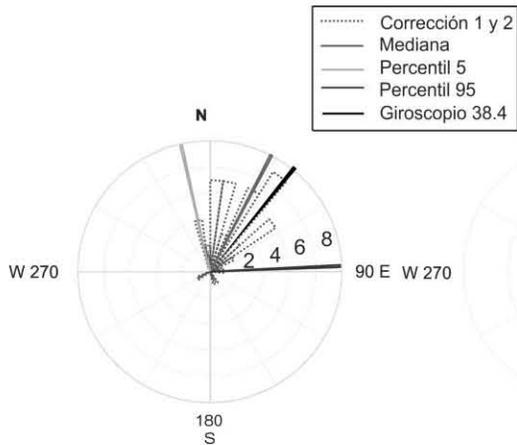
Época I

Fecha: 12/11/2013 - 13/11/2015

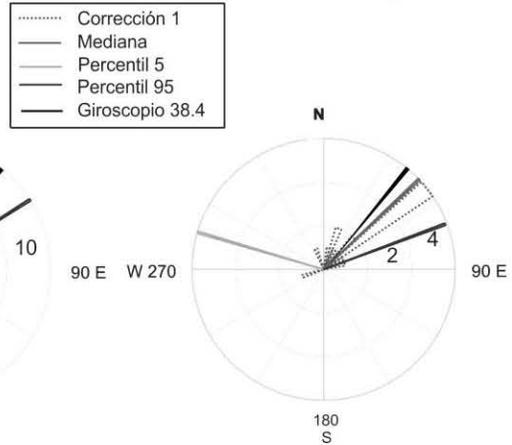
Digitalizador : Raftek 130

Sensor de velocidad : CMG-3T

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



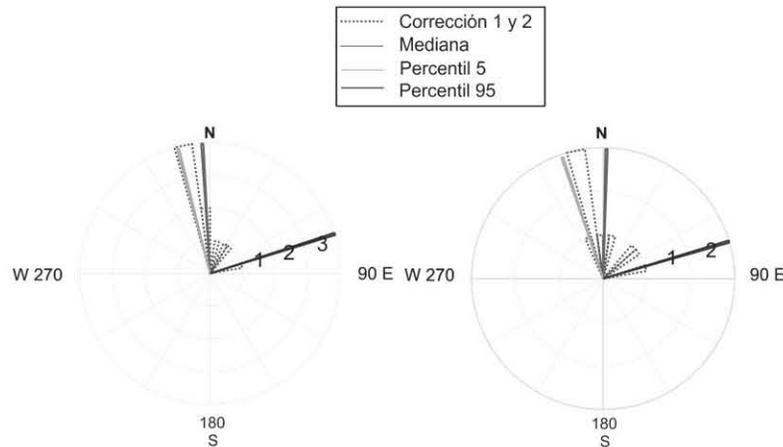
Época II

Fecha: 13/11/2015 - 13/07/2016

Digitalizador : Raftek 130

Sensor de velocidad : CMG-3T

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Época I	P5	P50	P95
PCA	-73.8	46.2	69.5
POR I	-17	28.7	57.8
POR II	-12.1	27.9	87.6

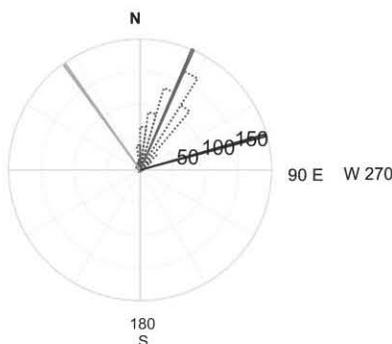
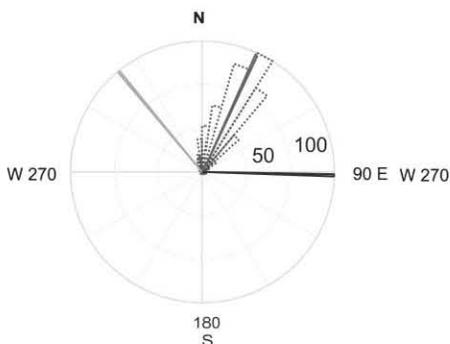
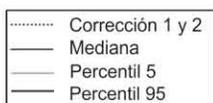
Época II	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-15.6	-3.9	72.6
POR II	-18.	1.6	73.6

Morelia, Michoacán

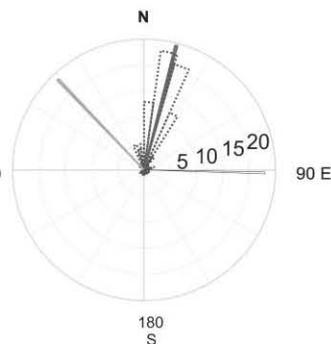
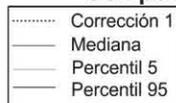
Época I

Fecha: 01/06/2000 - 12/08/2013
 Digitalizador : Q4126
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



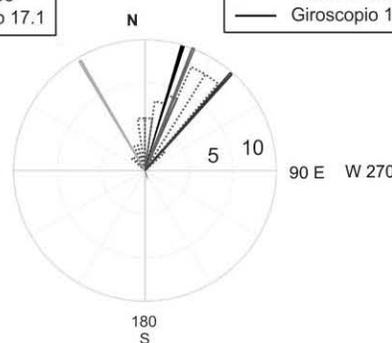
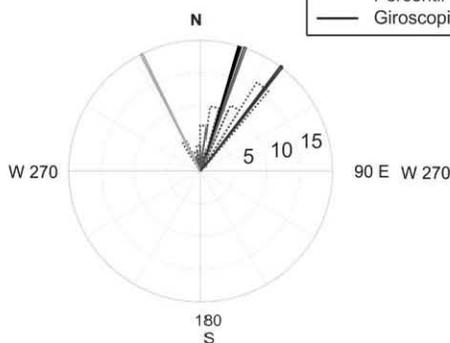
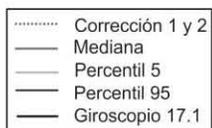
Estimación por medio de Componentes Principales



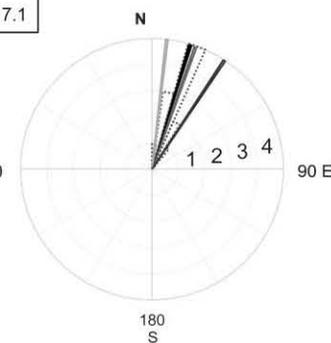
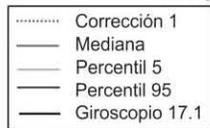
Época II

Fecha: 12/08/2013 - 27/09/2015
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-43.9	14.8	91.9
POR I	-36.7	23.5	74.7
POR II	-39.8	24.5	91.5

Época II	P5	P50	P95
PCA	6.6	19.8	65.9
POR I	-27.0	19.6	37.9
POR II	-30.2	21.7	41.9

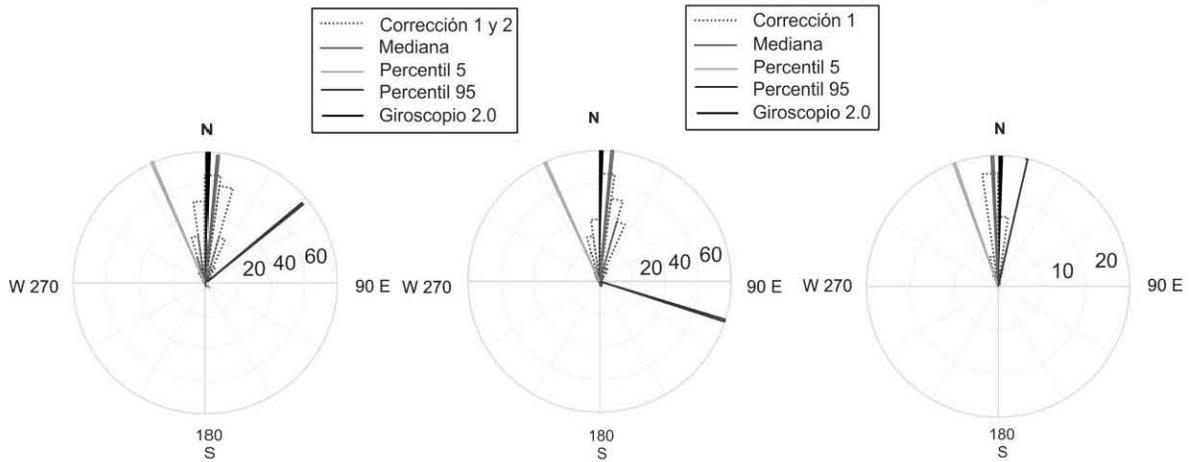
Mérida, Yucatán

Época I

Fecha: 12/04/2010 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh

Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-19.2	-2.1	12.2
POR I	-23.1	5.6	50.4
POR II	-24.7	5.3	107.5

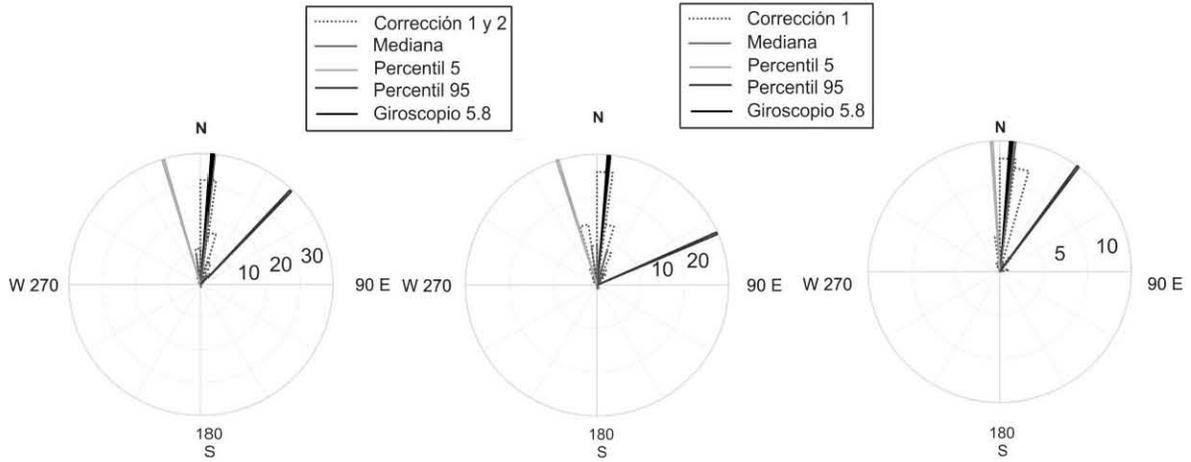
Nacozari, Sonora

Época I

Fecha: 22/10/2014 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh

Estimación por medio de Componentes Principales



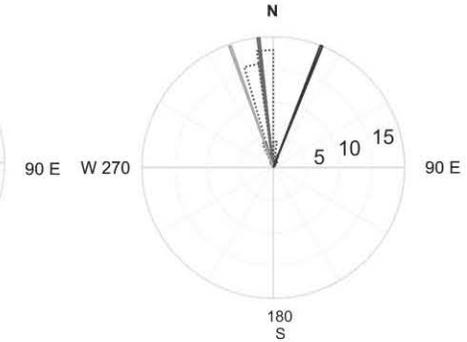
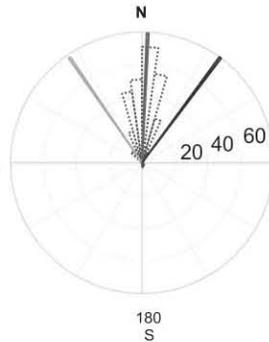
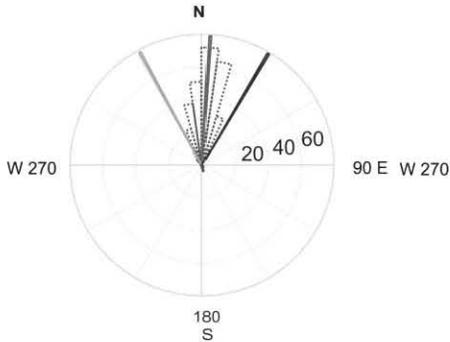
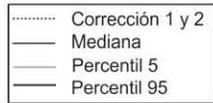
Época I	P5	P50	P95
PCA	-3.9	6.9	36.5
POR I	-16.1	5.4	43.9
POR II	-17.9	5.3	66.3

Oaxaca, Oaxaca

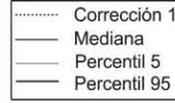
Época I

Fecha: 01/03/2001 - 22/01/2007
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



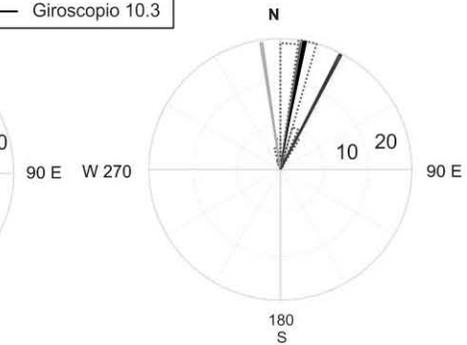
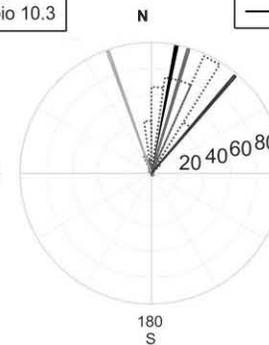
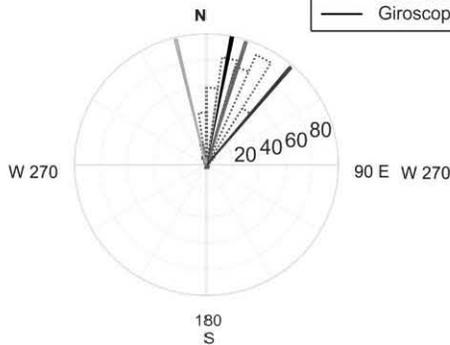
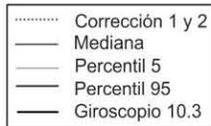
Estimación por medio de Componentes Principales



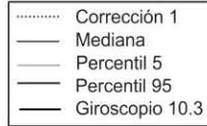
Época II

Fecha: 22/01/2007 - 30/03/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-19.5	-6.6	21.3
POR I	-28.6	3.0	30.0
POR II	-34.5	2.5	36.4

Época II	P5	P50	P95
PCA	-9.0	9.3	27.0
POR I	-13.2	17.3	40.1
POR II	-19.8	16.9	40.9

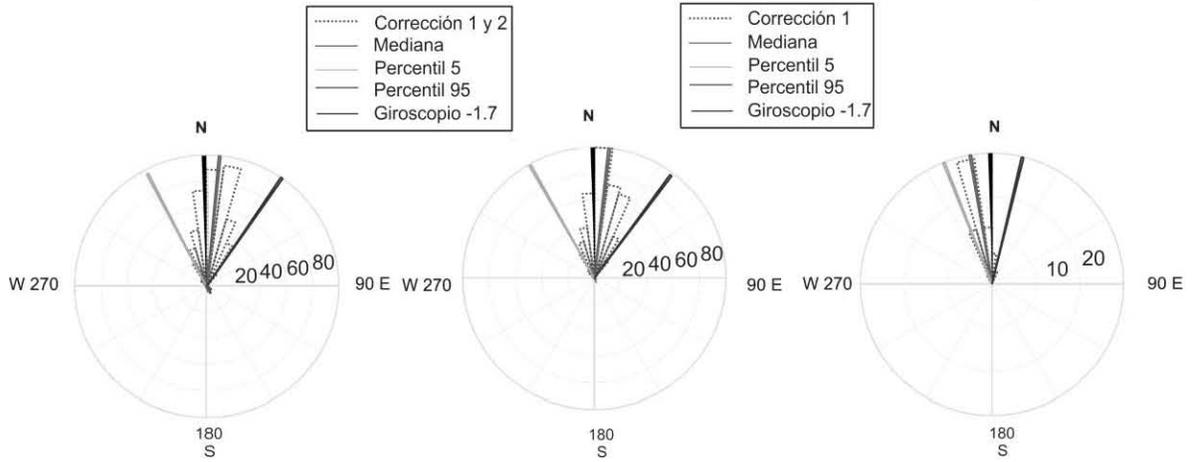
Pijijiapan, Chiapas

Época I

Fecha: 20/10/2007 - 19/08/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh

Estimación por medio de Componentes Principales



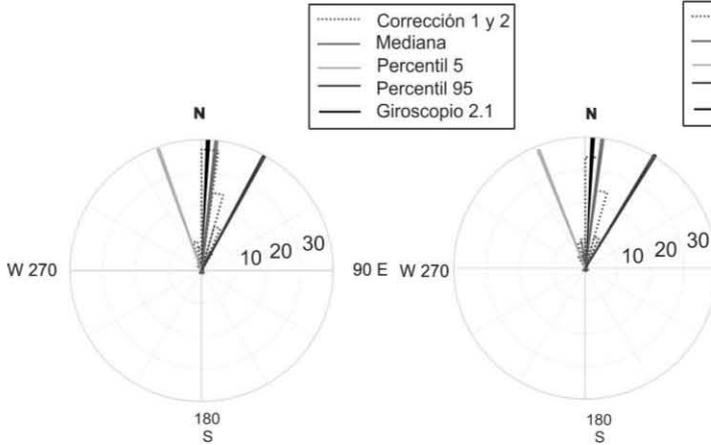
Época I	P5	P50	P95
PCA	-21.8	-10.0	10.1
POR I	-27.1	5.9	33.0
POR II	-29.4	6.0	34.5

Papasquiario, Durango

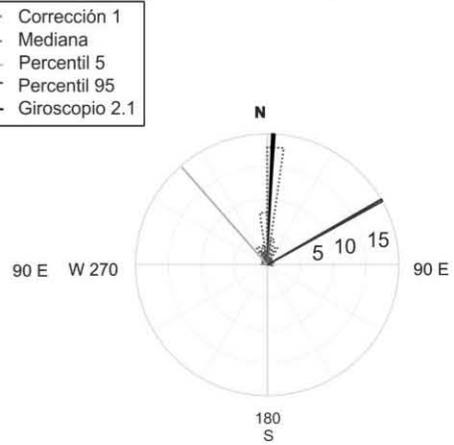
Época I

Fecha: 22/09/2012 - 19/01/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad :PBB-200S

Estimación por medio de ondas Rayleigh



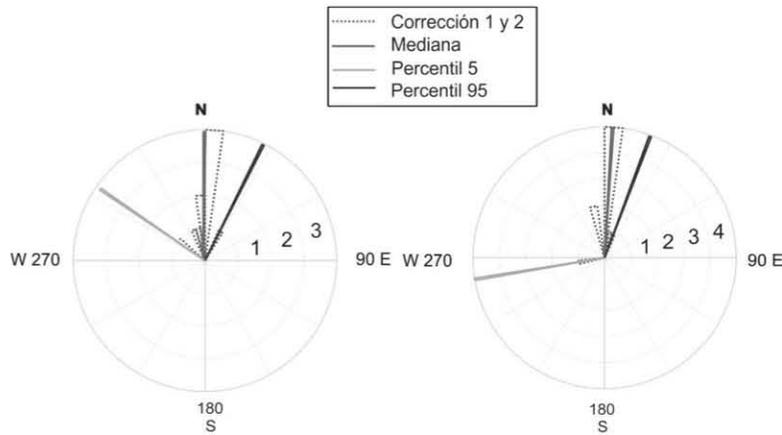
Estimación por medio de Componentes Principales



Época II

Fecha: 19/01/2016 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad :PBB-200S

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Época I	P5	P50	P95
PCA	-41.4	2.6	60.6
POR I	-19.8	6.1	27.7
POR II	-21,4	7.3	31.5

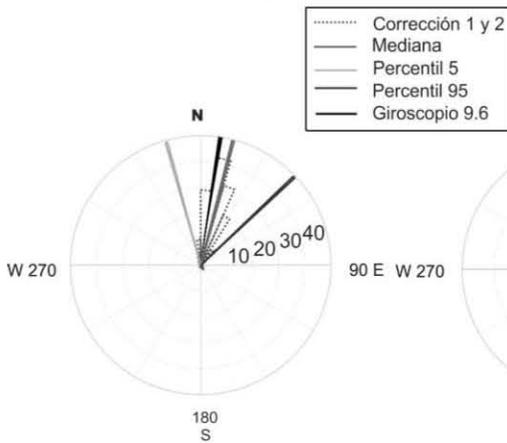
Época II	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-55.9	0.3	26.3
POR II	-99.9	3.8	20.3

Puerto Escondido, Oaxaca

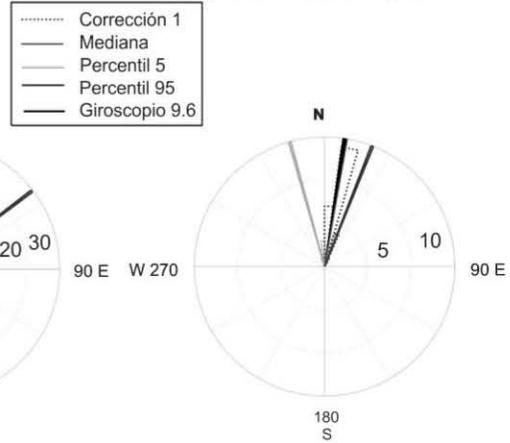
Época I

Fecha: 22/09/2012 - 01/04/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : Trillium 120PA

Estimación por medio de ondas Rayleigh



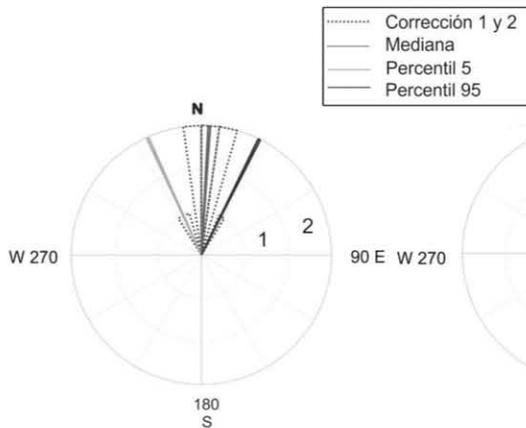
Estimación por medio de Componentes Principales



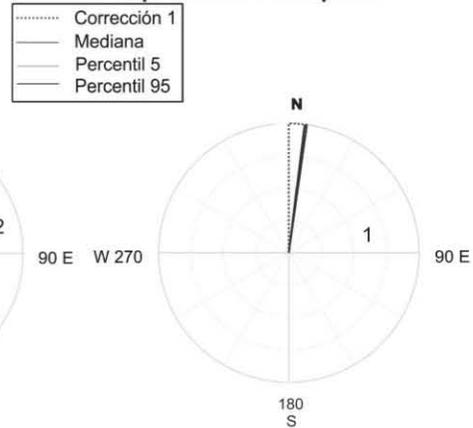
Época II

Fecha: 01/04/2016 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : Trillium 120PA

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-15.3	9.9	21.7
POR I	-15.0	14.1	46.4
POR II	-19.4	14.5	52.8

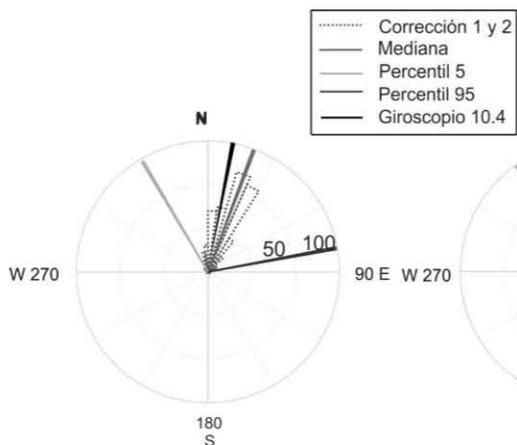
Época II	P5	P50	P95
PCA	6.3	6.8	7.2
POR I	-24.7	3.7	26.2
POR II	-27.2	3.9	42.7

Platanillo, Guerrero

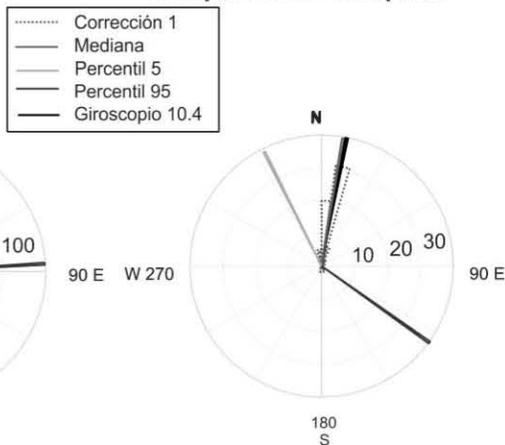
Época I

Fecha: 16/01/2009 - 30/11/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



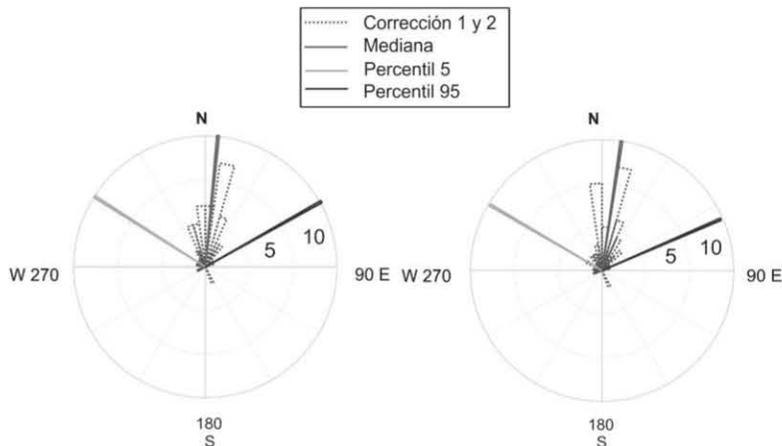
Estimación por medio de Componentes Principales



Época II

Fecha: 30/11/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Época I	P5	P50	P95
PCA	-26.9	9.5	125.8
POR I	-30.6	20.3	79.4
POR II	-35.6	20.7	86.2

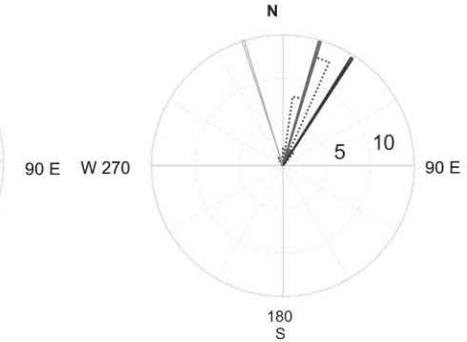
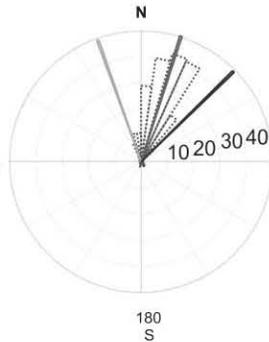
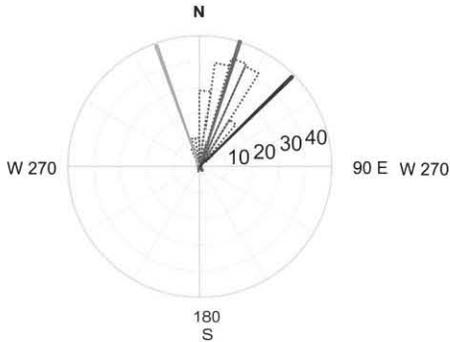
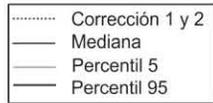
Época II	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-57.4	5.6	60.8
POR II	-59.9	8.7	66.3

Pinotepa Nacional, Oaxaca

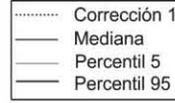
Época I

Fecha: 11/01/2002 - 11/07/2007
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



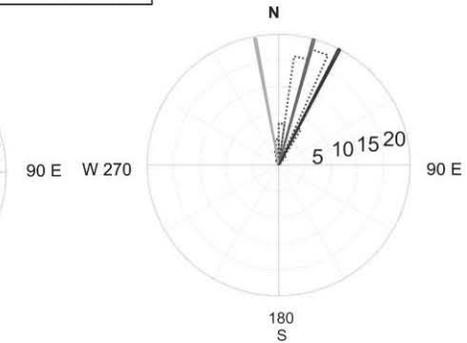
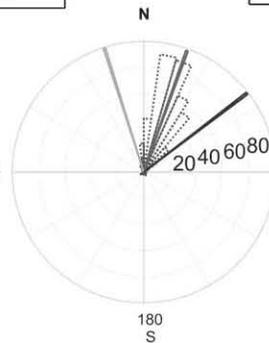
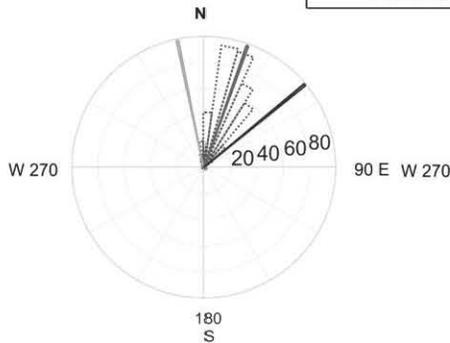
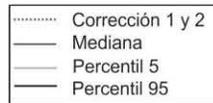
Estimación por medio de Componentes Principales



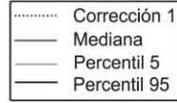
Época II

Fecha: 11/07/2007 - 29/10/2013
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-17.9	16.6	32.6
POR I	-11.1	18.0	43.7
POR II	-17.5	17.1	45.5

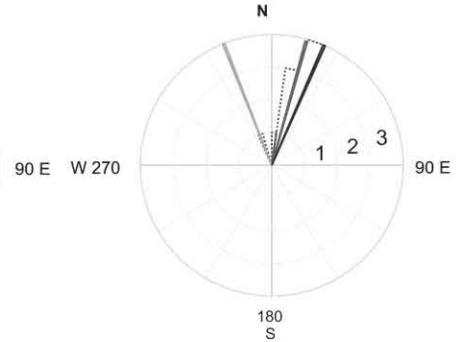
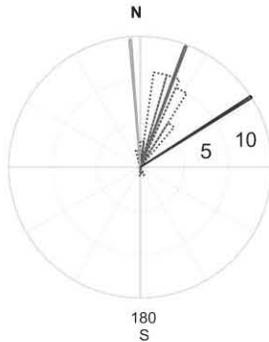
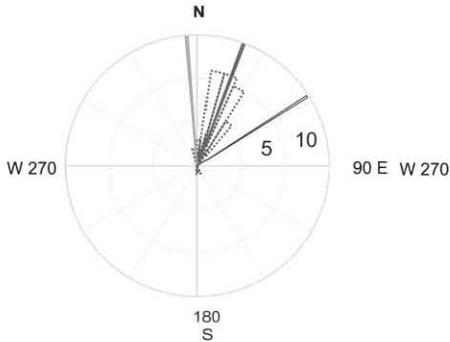
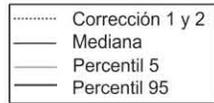
Época II	P5	P50	P95
PCA	-19.8	15.4	27.9
POR I	-11.1	19.5	50.4
POR II	-17.5	19.1	52.6

Pinotepa Nacional, Oaxaca

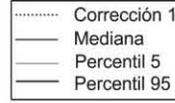
Época III

Fecha: 29/10/2013 - 26/06/2014
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



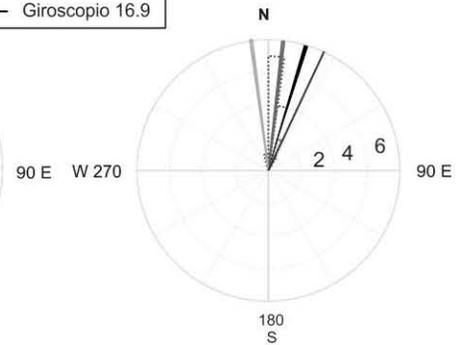
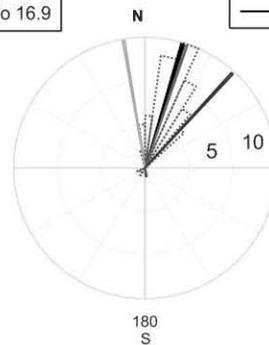
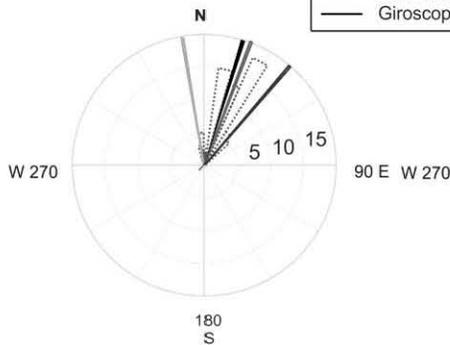
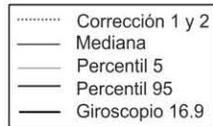
Estimación por medio de Componentes Principales



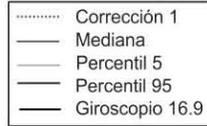
Época IV

Fecha: 26/06/2014 - 08/08/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época III	P5	P50	P95
PCA	-21.9	15.8	23.1
POR I	-4.3	20.1	57.7
POR II	-7.4	19.7	64.3

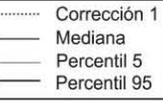
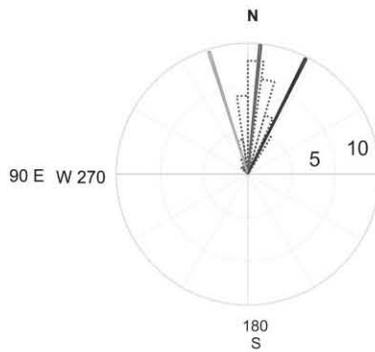
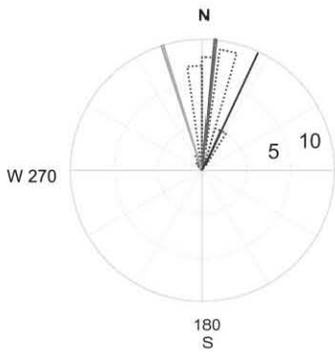
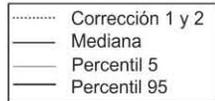
Época IV	P5	P50	P95
PCA	-7.8	7.0	24.2
POR I	-9.7	20.0	40.5
POR II	-9.7	18.7	42.4

Pinotepa Nacional, Oaxaca

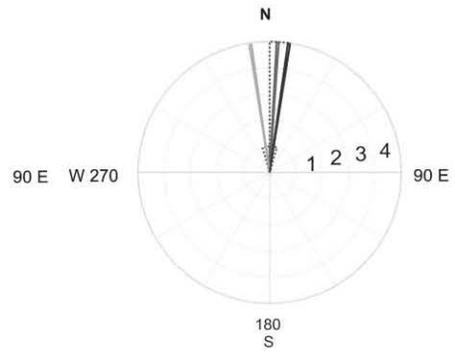
Época V

Fecha: 08/08/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales

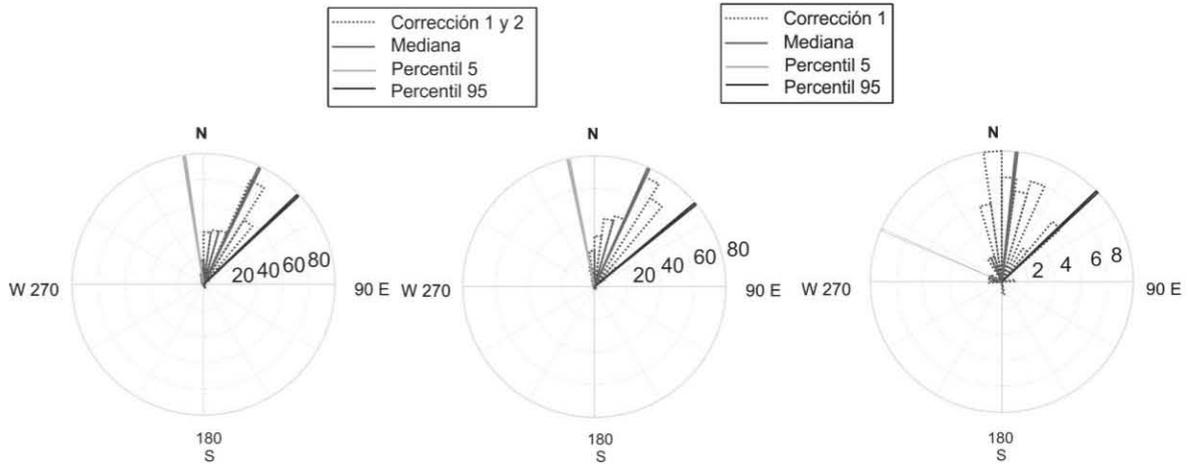


Época V	P5	P50	P95
PCA	-8.2	3.7	8.8
POR I	-17.1	5.2	24.7
POR II	-17.4	5.2	26.1

Popocatepetl, Puebla

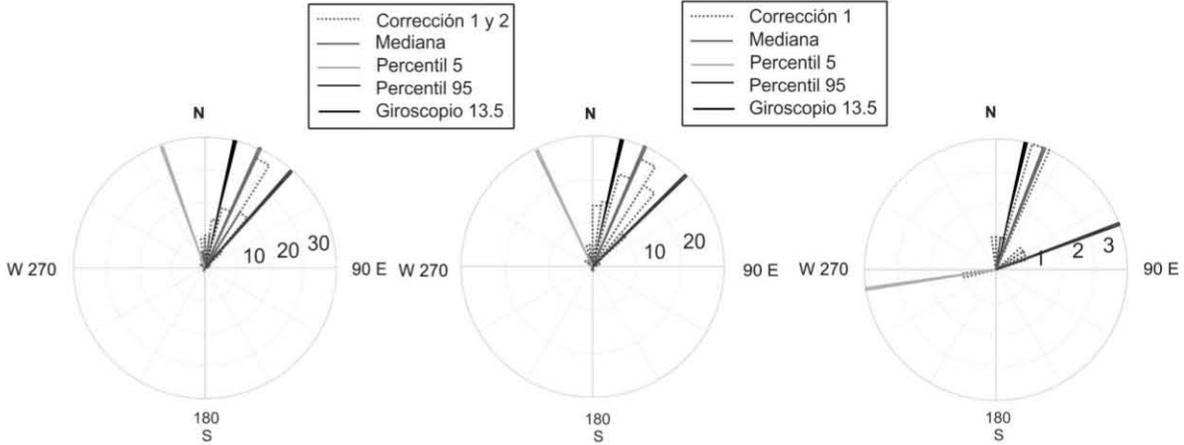
Época I

Fecha: 13/07/2004 - 01/05/2014
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)



Época II

Fecha: 01/05/2014 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)



Época I	P5	P50	P95
PCA	-66.6	6.1	46.0
POR I	-9.0	25.2	46.8
POR II	-11.9	25.0	51.0

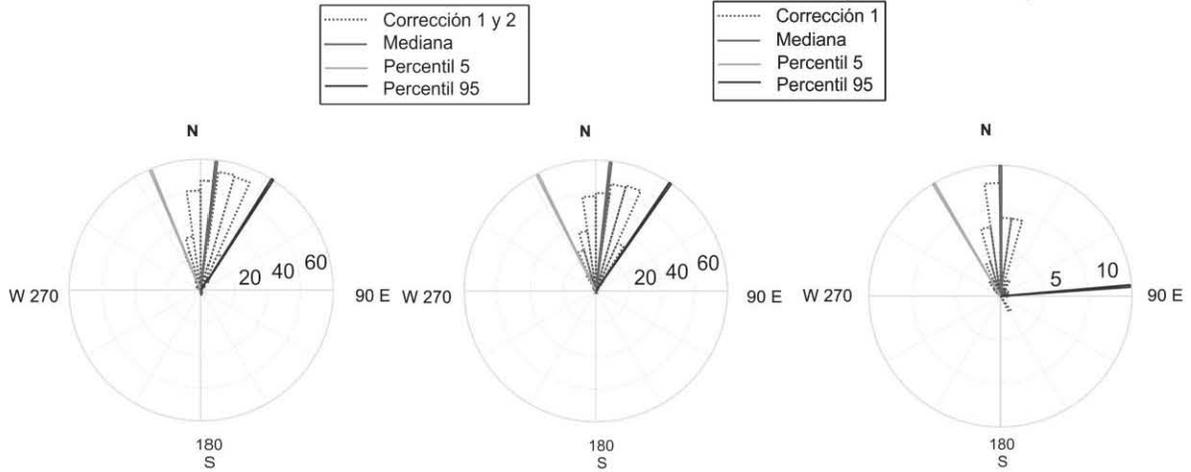
Época II	P5	P50	P95
PCA	-98.6	21.4	69.9
POR I	-19.6	24.0	41.3
POR II	-23.5	23.3	45.3

Pozo, Ciudad de México

Época I

Fecha: 02/07/2008 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330HR
 Sensor de velocidad : STS-1H/VBB
Estimación por medio de
Componentes Principales

Estimación por medio de ondas Rayleigh



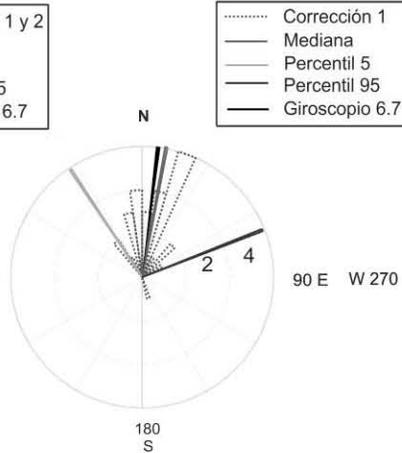
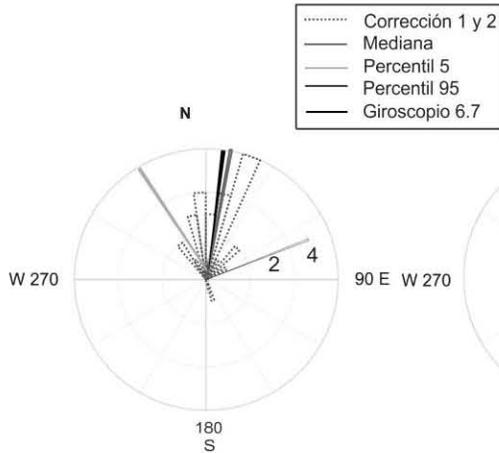
Época II	P5	P50	P95
PCA	-30.9	-0.5	85.5
POR I	-22.4	6.8	32.2
POR II	-26.0	6.8	34.3

Río Verde, San Luis Potosí

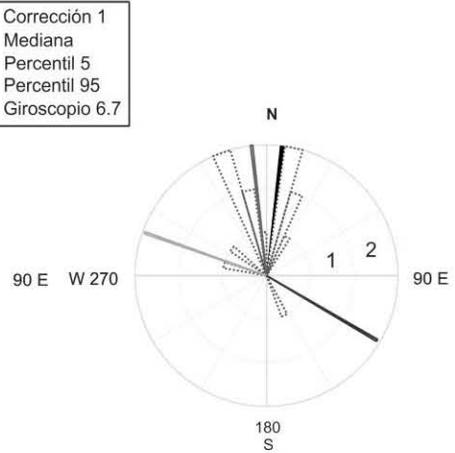
Época I

Fecha: 14/05/2014 - 09/06/2015
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : PBB 200-S

Estimación por medio de ondas Rayleigh



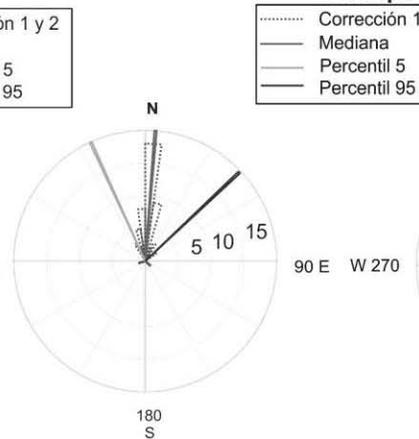
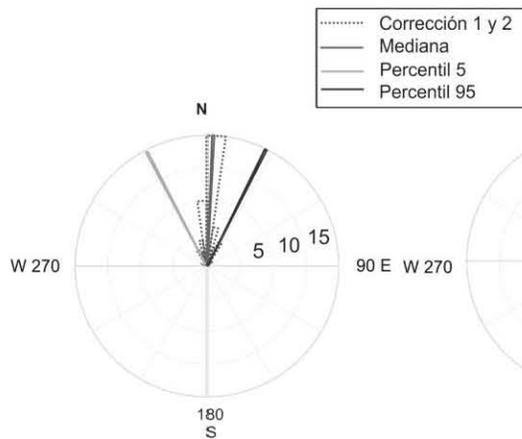
Estimación por medio de Componentes Principales



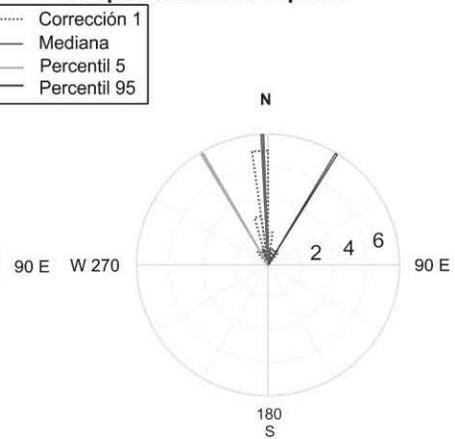
Época II

Fecha: 09/06/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-19.34	-6.3	120.7
POR I	-27.3	10.5	71.6
POR II	-33.1	10.8	68.3

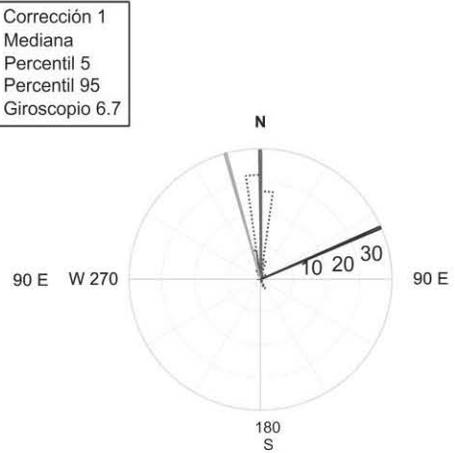
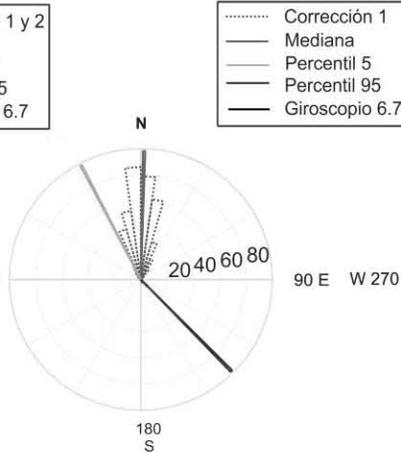
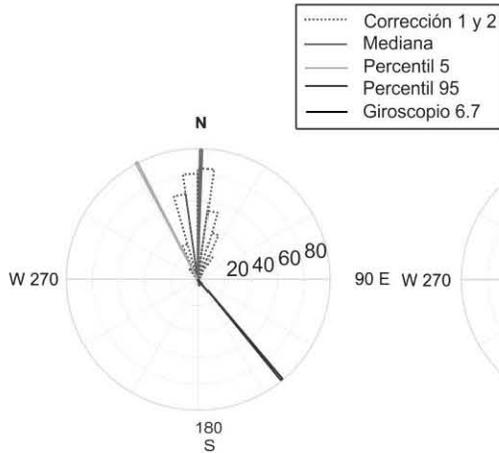
Época II	P5	P50	P95
PCA	-30.4	-2.9	31.4
POR I	-27.1	2.4	26.6
POR II	-24.2	4.2	46.3

Sabancuy, Campeche

Época I

Fecha: 24/06/2004 - 28/03/2014
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh

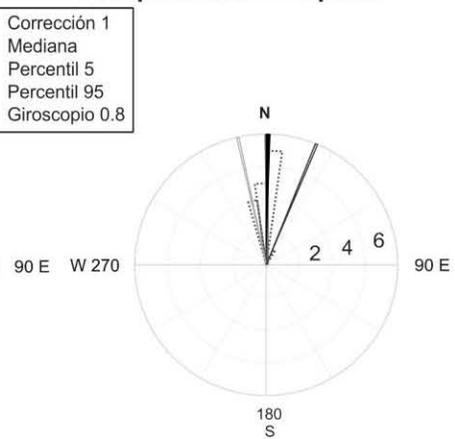
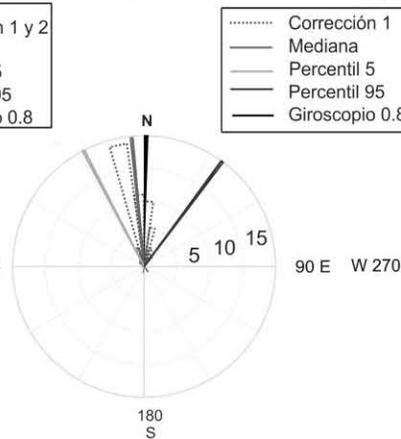
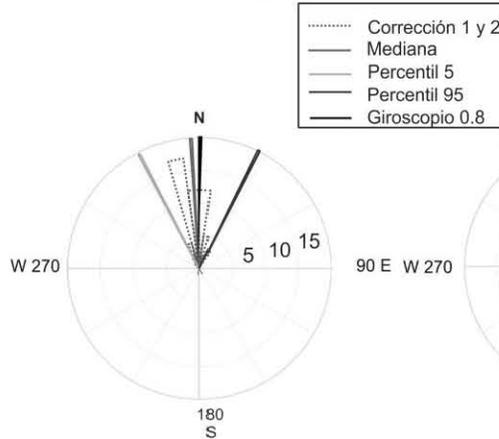


Estimación por medio de Componentes Principales

Época II

Fecha: 28/03/2014 - 11/04/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales

Época I	P5	P50	P95
PCA	-15.9	-0.4	66.3
POR I	-27.0	1.7	140.6
POR II	-27.9	1.5	135.0

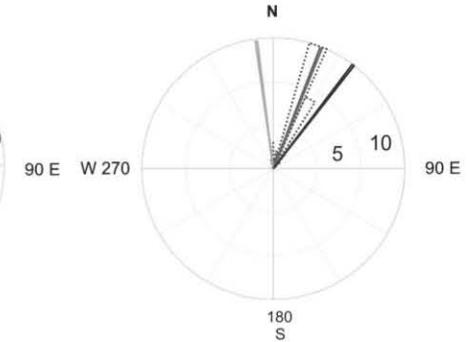
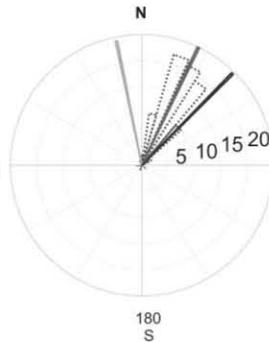
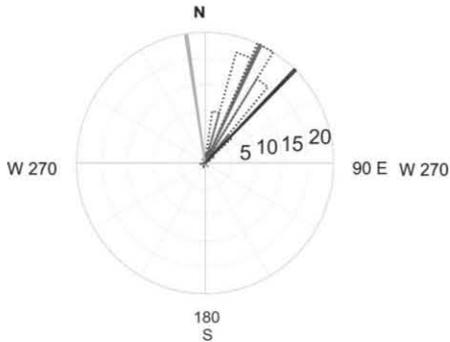
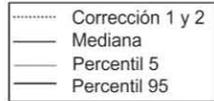
Época II	P5	P50	P95
PCA	-12	-0.6	22.8
POR I	-27.4	-3.9	26.2
POR II	-27.2	-5.6	36.9

San Pedro Mártir, Baja California

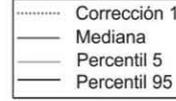
Época I

Fecha: 26/06/2008 - 28/10/2010
 Digitalizador : Q680
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



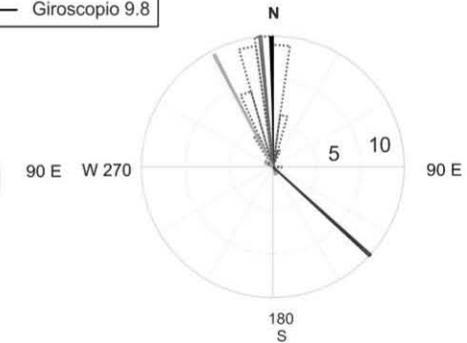
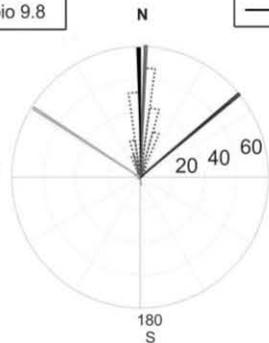
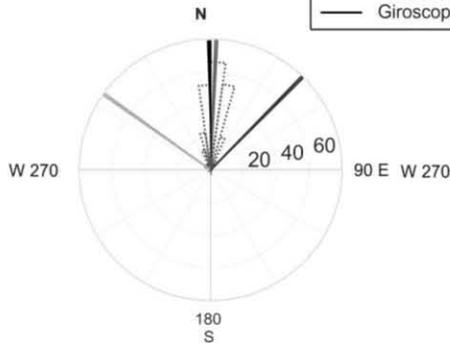
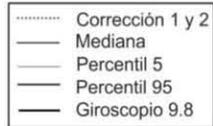
Estimación por medio de Componentes Principales



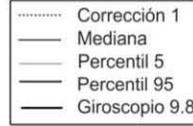
Época II

Fecha: 28/10/2010 - 24/10/2015
 Digitalizador : Q330HR
 Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-7.4	21.1	21.7
POR I	-8.4	27.6	36.8
POR II	-11.9	25.3	37.5

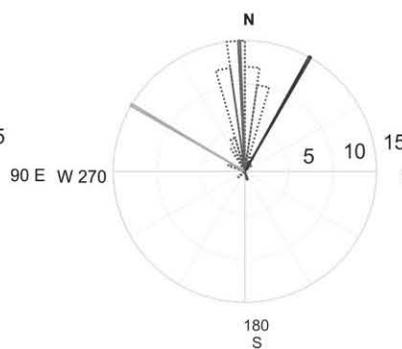
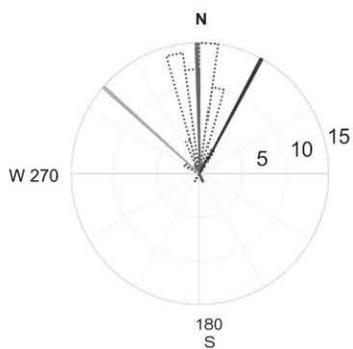
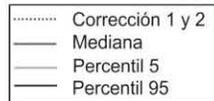
Época II	P5	P50	P95
PCA	-27.7	-5.37	132
POR I	-54.3	2.1	44.2
POR II	-57.9	2.4	50.2

San Pedro Mártir, Baja California

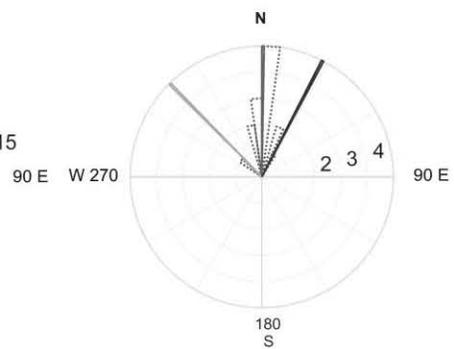
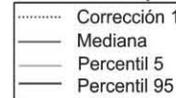
Época III

Fecha: 24/10/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330HR
 Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época III	P5	P50	P95
PCA	-44.8	0.6	27.3
POR I	-48.1	1.9	28.1
POR II	-59.46	2.9	29.2

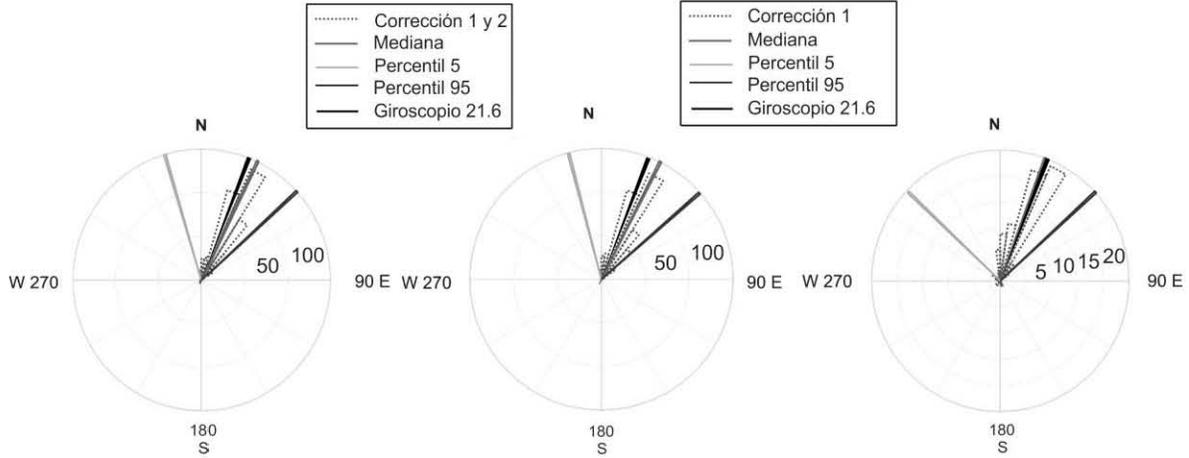
Santa Rosalía, Baja California Sur

Época I

Fecha: 28/02/2008 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh

Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-47.0	20.4	47.1
POR I	-16.0	26.0	47.5
POR II	-14.3	26.2	48.7

Presa Sanalona, Sinaloa

Época I

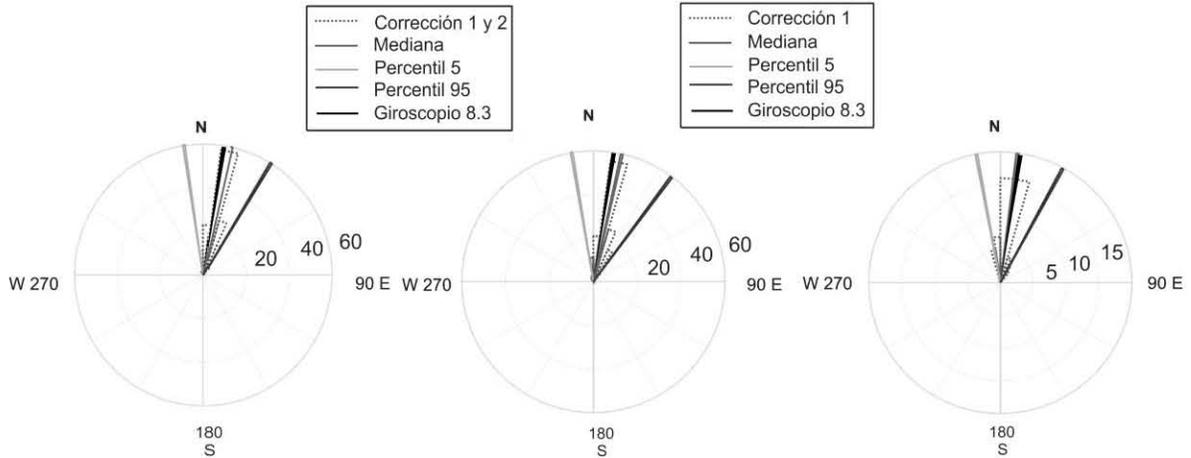
Fecha: 17/08/2013 - 13/07/2016

Digitalizador : Q330S

Sensor de velocidad CMG_3T:

Estimación por medio de ondas Rayleigh

Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-10.4	7.7	29.0
POR I	-8.4	12.5	31.5
POR II	-10.0	12.7	36.5

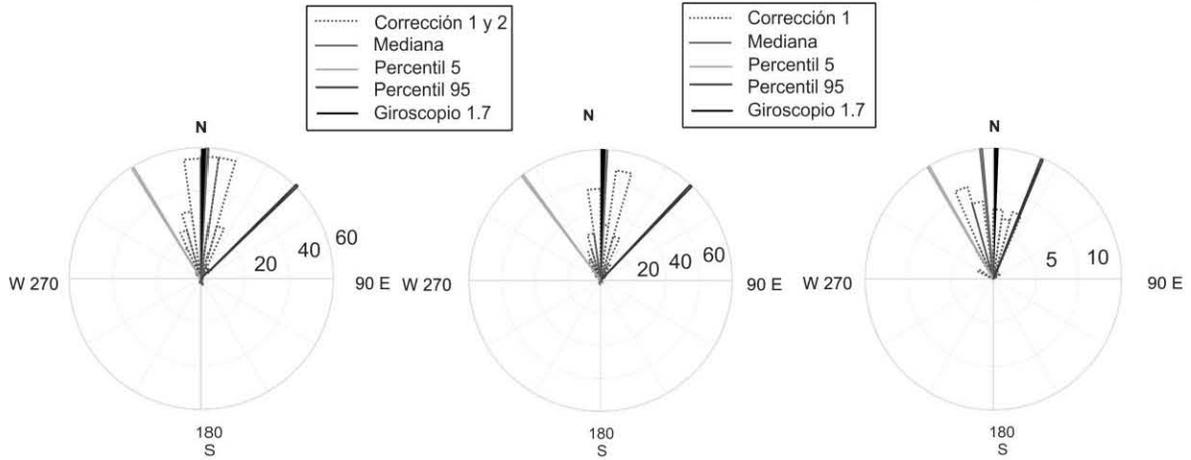
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Época I

Fecha: 01/06/2007 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh

Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-30.9	-5.1	22.5
POR I	-31.3	2.2	45.2
POR II	-36.4	2.9	43.8

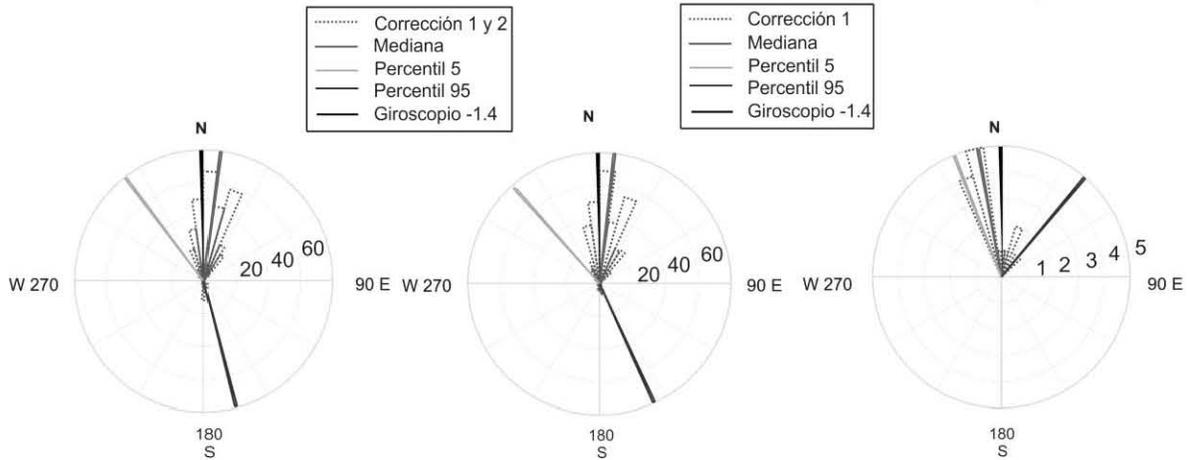
Tapachula, Chiapas

Época I

Fecha: 30/05/2007 - 02/06/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh

Estimación por medio de Componentes Principales



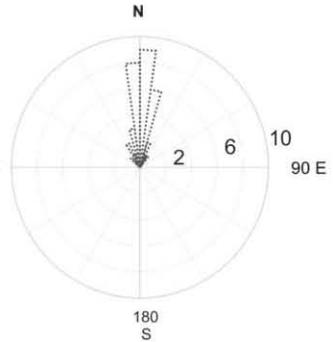
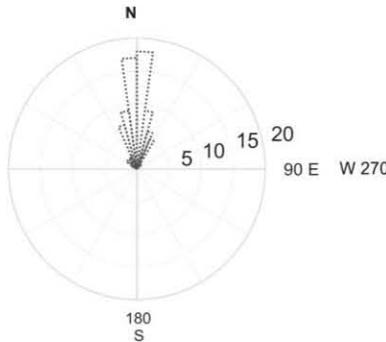
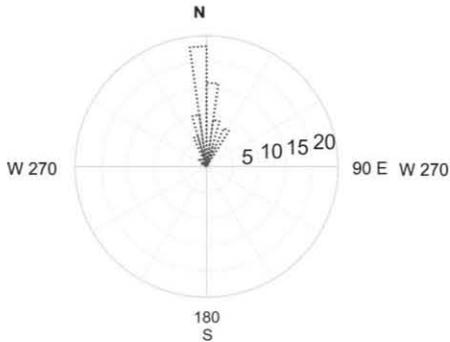
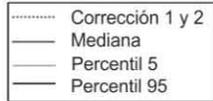
Época II	P5	P50	P95
PCA	-21.4	-10.2	40.1
POR I	-37.4	7.6	165.7
POR II	-41.1	6.0	155.2

Tijuana, Baja California

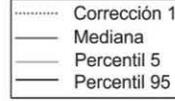
Época I

Fecha: 03/10/2010 - 09/10/2014
 Digitalizador : Q680
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



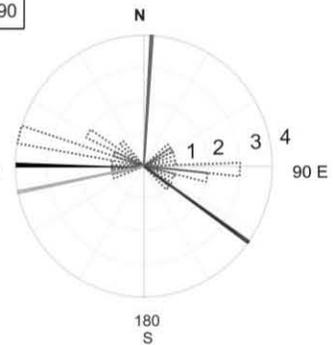
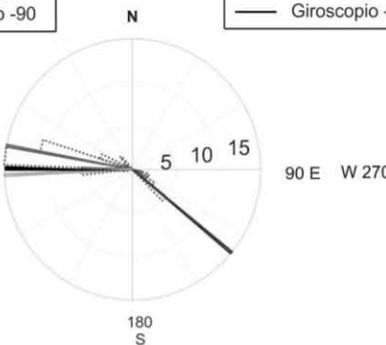
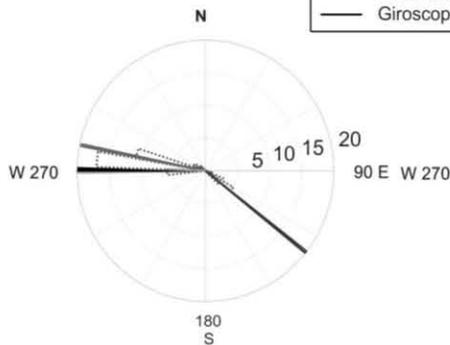
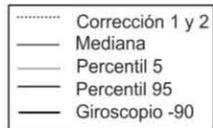
Estimación por medio de Componentes Principales



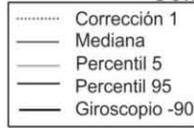
Época II

Fecha: 09/10/2014 - 23/10/2015
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-29.9	1.57	24.4
POR I	-28.2	-0.3	26.2
POR II	-44.5	0.1	30.4

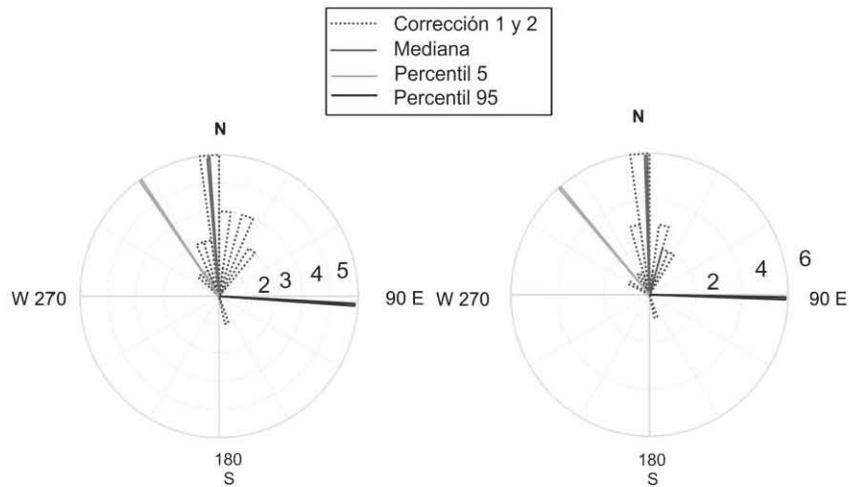
Época II	P5	P50	P95
PCA	-101.5	3.2	88.2
POR I	-90.6	-78.7	128
POR II	-92.1	-79.2	129

Tijuana, Baja California

Época I

Fecha: 23/10/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330s
 Sensor de velocidad : Trillium 240

Estimación por medio de ondas Rayleigh



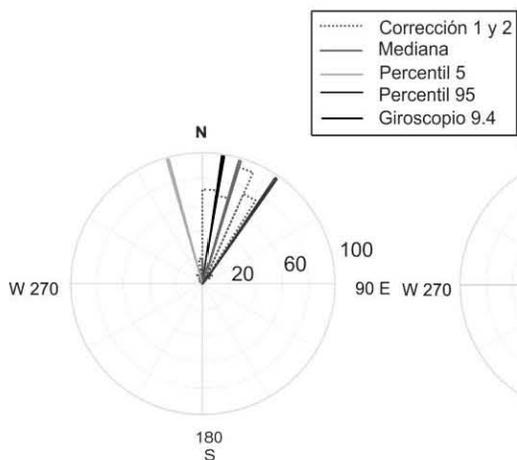
Época II	P5	P50	P95
PCA	--	--	--
POR I	-34.8	-4.2	93.4
POR II	-40.3	-1.9	91.4

Tlapa, Oaxaca

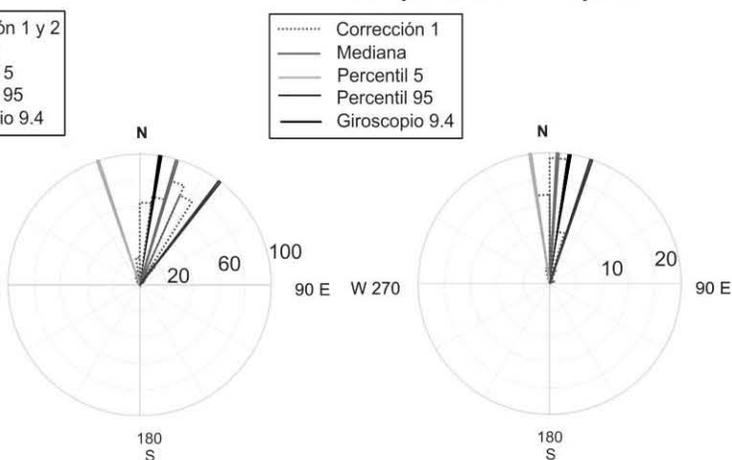
Época I

Fecha: 13/10/2009 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G3)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



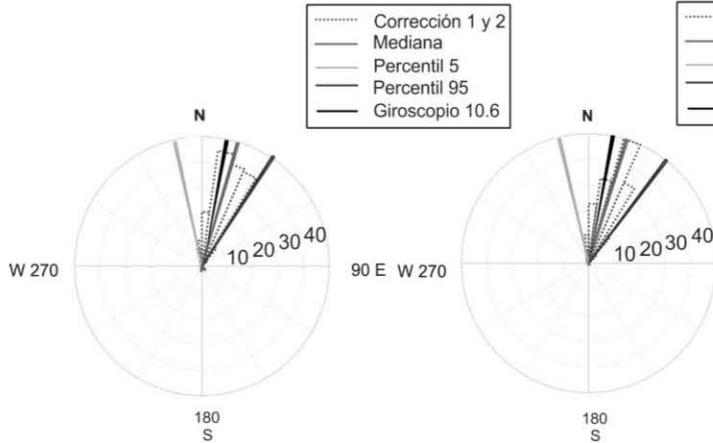
Época I	P5	P50	P95
PCA	-8.8	3.7	10.9
POR I	-15.2	16.3	34.7
POR II	-18.2	16.7	36.9

Toxpalán, Oaxaca

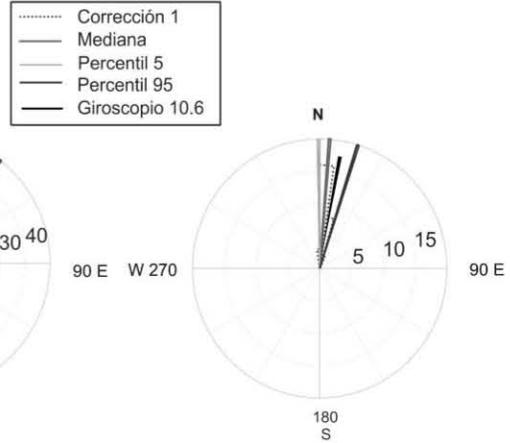
Época I

Fecha: 12/09/2012 - 28/03/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : Trillium 120PA

Estimación por medio de ondas Rayleigh



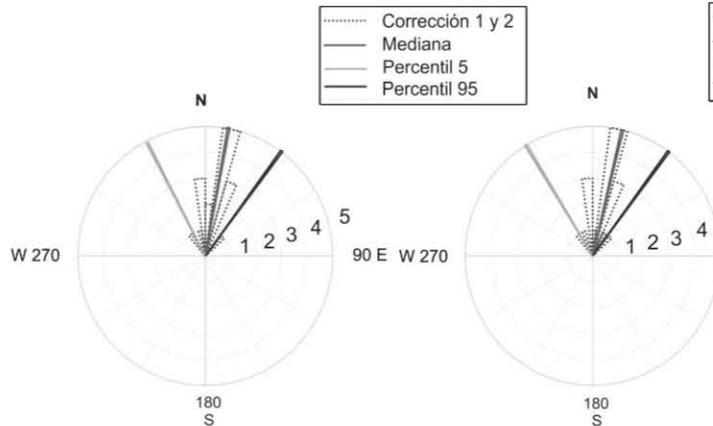
Estimación por medio de Componentes Principales



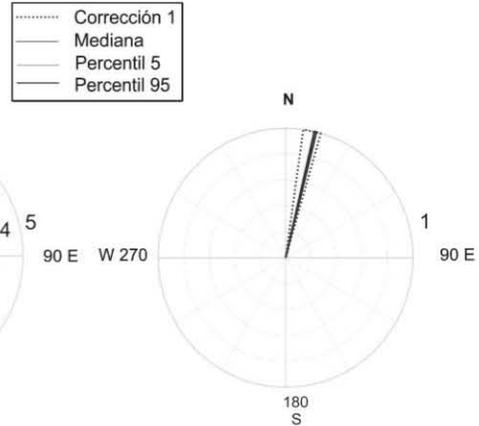
Época II

Fecha: 28/03/2016 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : Trillium 120PA

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-9.3	4.4	51
POR I	-12.1	16.7	33.3
POR II	-13.2	17.6	37.9

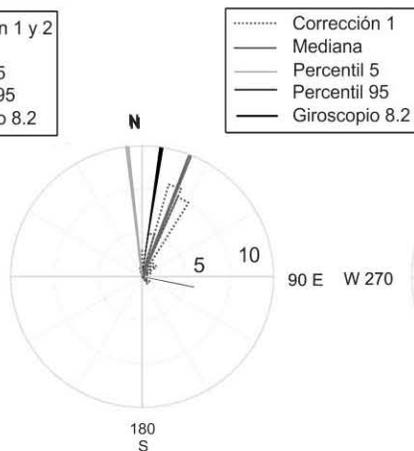
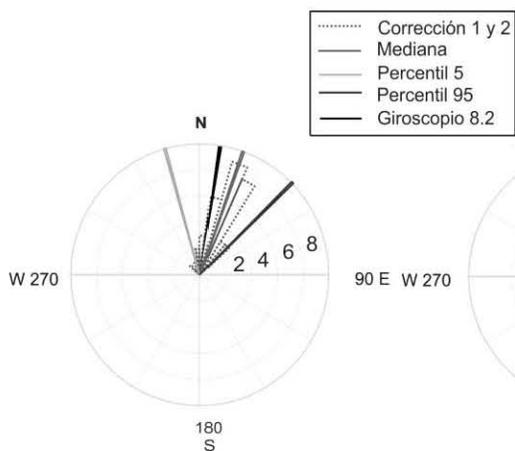
Época II	P5	P50	P95
PCA	13.4	13.4	13.4
POR I	-27.3	10.2	36.9
POR II	-31	13.2	36.7

Tehuacán, Puebla

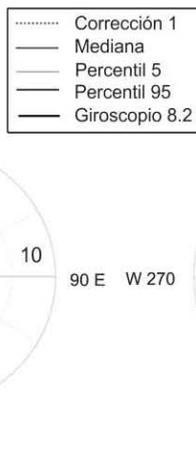
Época I

Fecha: 30/10/2010 - 09/10/2014
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



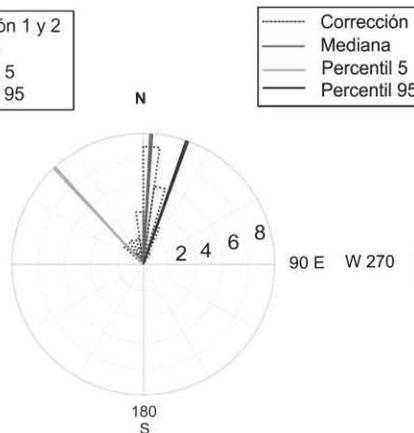
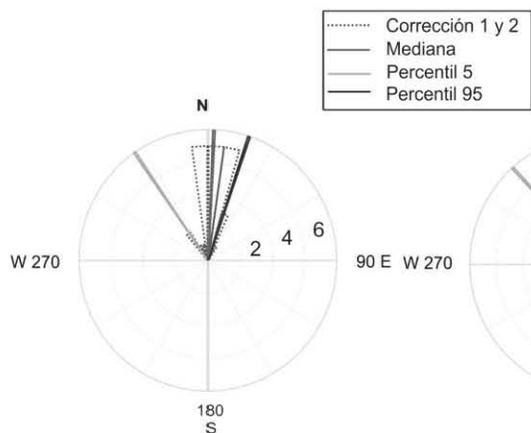
Estimación por medio de Componentes Principales



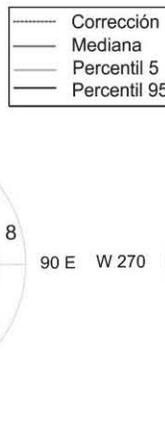
Época II

Fecha: 05/02/2016 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-9.3	8.4	51
POR I	-15.2	19.6	45.1
POR II	-6.7	21.9	101.3

Época II	P5	P50	P95
PCA	-10.3	2.59	21.7
POR I	-34.3	2.2	18.8
POR II	-42.5	3.2	19.8

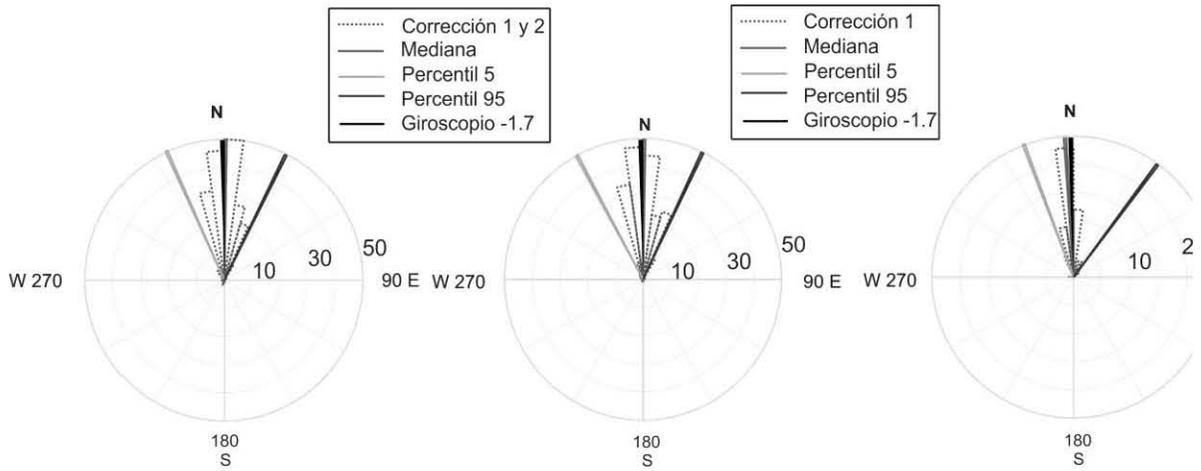
Topolobampo, Sinaloa

Época I

Fecha: 01/10/2010 - 13/07/2
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : STS-2

Estimación por medio de ondas Rayleigh

Estimación por medio de Componentes Principales



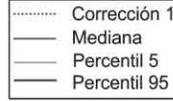
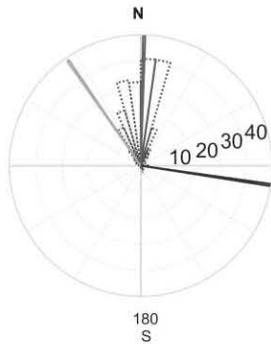
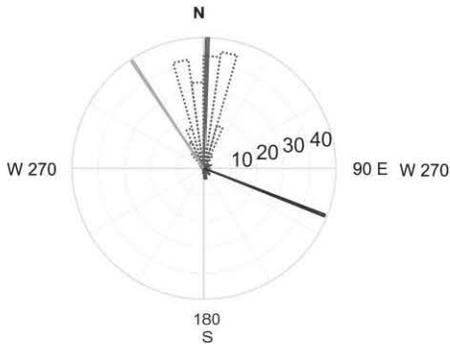
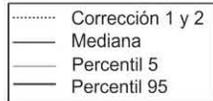
Época II	P5	P50	P95
PCA	-20.12	-3.1	36.5
POR I	-24.5	-0.9	26.0
POR II	-28.6	-0.4	25.5

Tuzandepetl, Veracruz

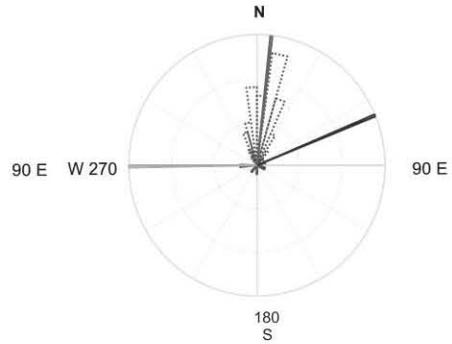
Época I

Fecha: 30/10/2010 - 30/03/2014
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



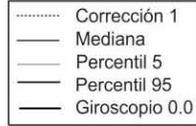
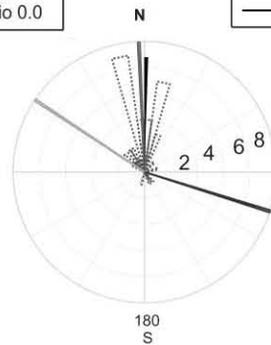
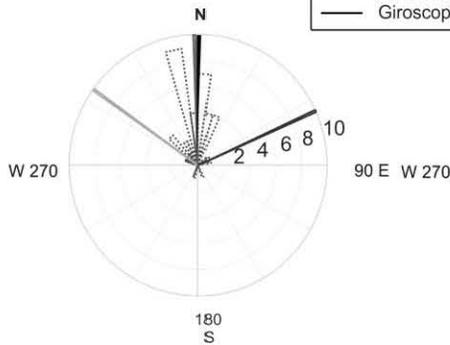
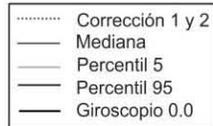
Estimación por medio de Componentes Principales



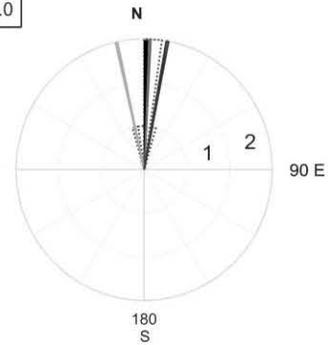
Época II

Fecha: 30/03/2014 - 20/08/2015
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-95.3	6.88	67.2
POR I	-33.6	1.6	111.9
POR II	-34.1	1.3	98.2

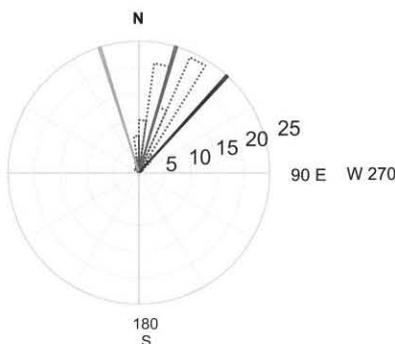
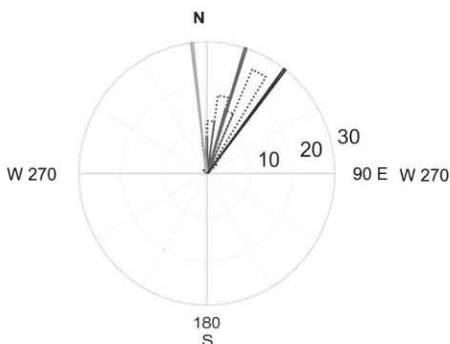
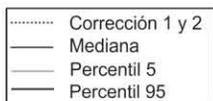
Época II	P5	P50	P95
PCA	-12.6	2.4	10.3
POR I	-54.0	-1.6	65.3
POR II	-56.6	-2.0	107.2

Tlaxiaco, Oaxaca

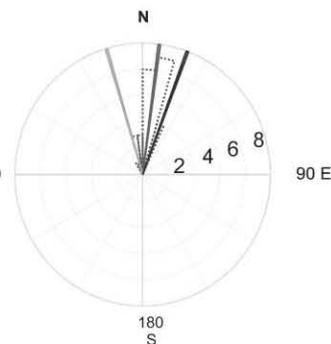
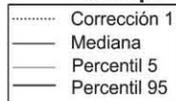
Época I

Fecha: 3/09/2012 - 08/04/2014
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : Trillium 120PA

Estimación por medio de ondas Rayleigh



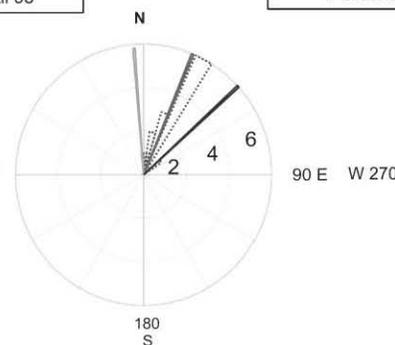
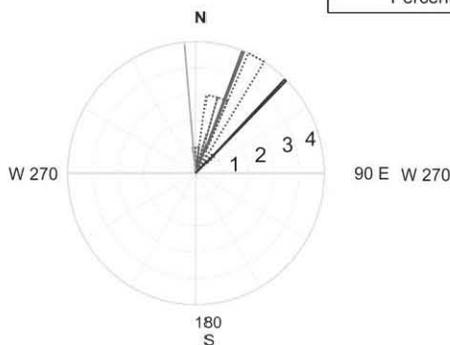
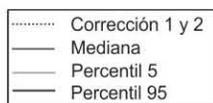
Estimación por medio de Componentes Principales



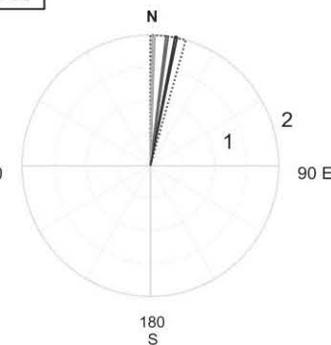
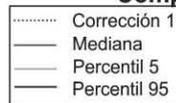
Época II

Fecha: 08/04/2014 - 21/06/2014
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : Trillium 120PA

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-16.8	7.6	20.6
POR I	-6.9	17.4	37.9
POR II	-17.3	16.3	42.7

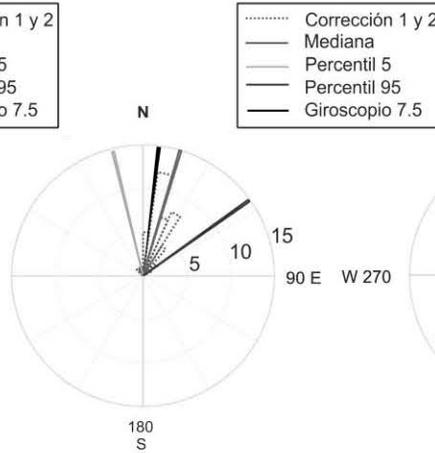
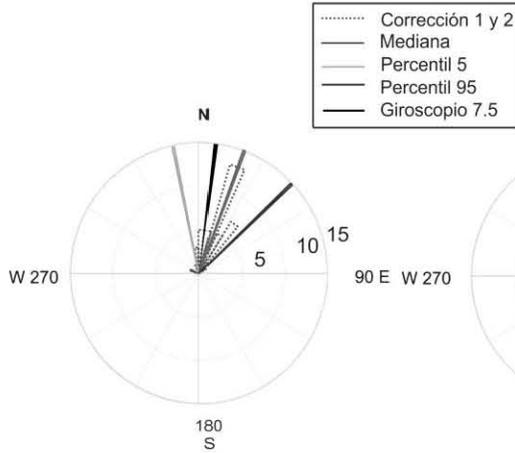
Época II	P5	P50	P95
PCA	1.6	7.4	21.7
POR I	-4.8	21.2	36.8
POR II	-4.2	22.4	37.5

Tlaxiaco, Oaxaca

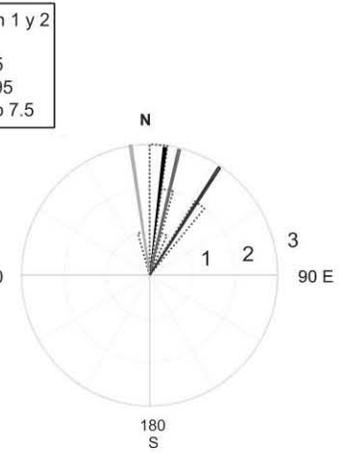
Época III

Fecha: 21/06/2014 - 06/08/2015
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : Trillium 120PA

Estimación por medio de ondas Rayleigh



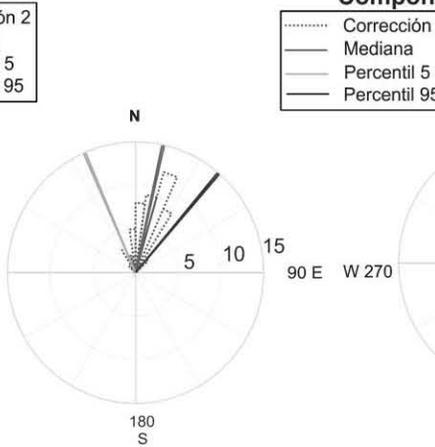
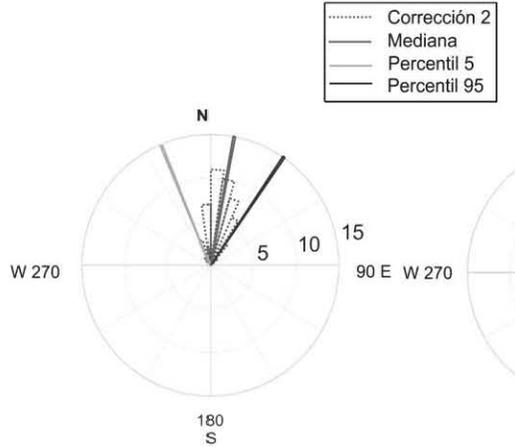
Estimación por medio de Componentes Principales



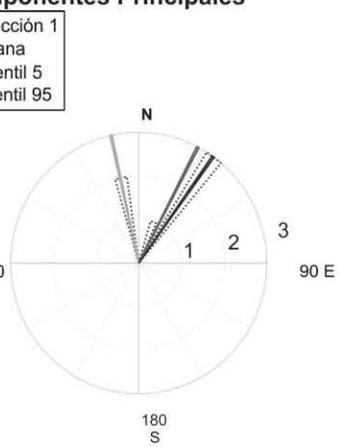
Época IV

Fecha: 06/08/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : Trillium 120PA

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época III	P5	P50	P95
PCA	-8.6	13.4	33.6
POR I	-11.5	20.0	46.6
POR II	-13.8	16.8	55.0

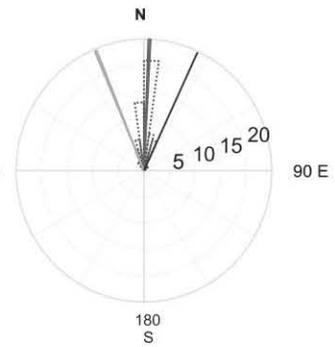
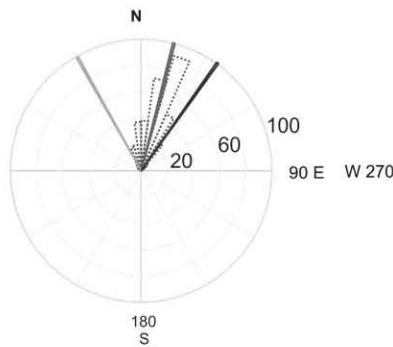
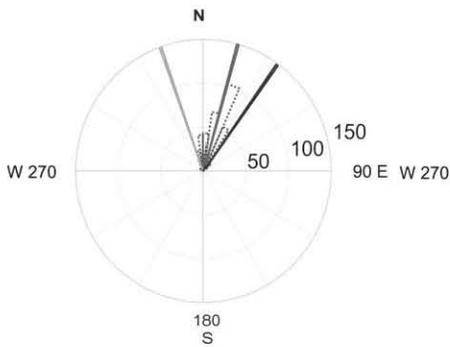
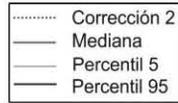
Época IV	P5	P50	P95
PCA	-12.5	27.5	35.5
POR I	-22.3	10.0	34.7
POR II	-23.8	12.9	40.2

Yautepec, Morelos

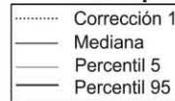
Época I

Fecha: 18/10/2001 - 09/01/2009
 Digitalizador : Q680LT/G
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



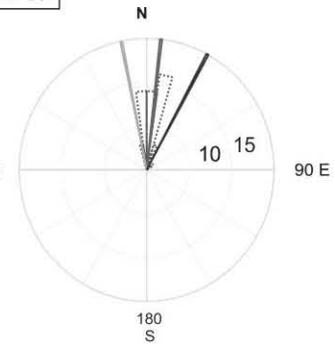
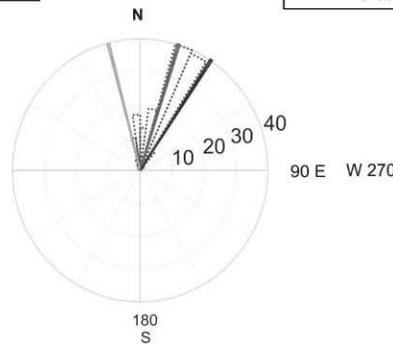
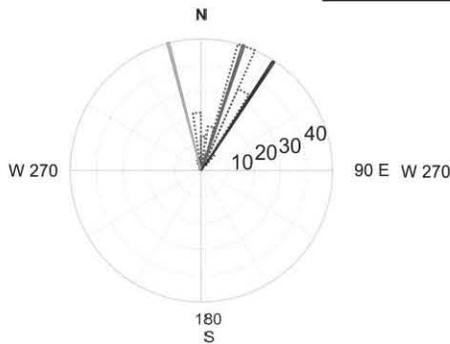
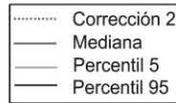
Estimación por medio de Componentes Principales



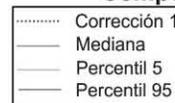
Época II

Fecha: 09/01/2009 - 12/05/2012
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-22.0	2.4	15.4
POR I	-19.9	15.3	35.3
POR II	-29.3	14.3	37.5

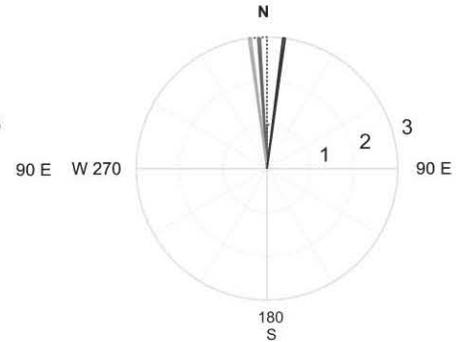
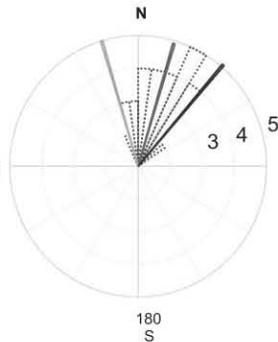
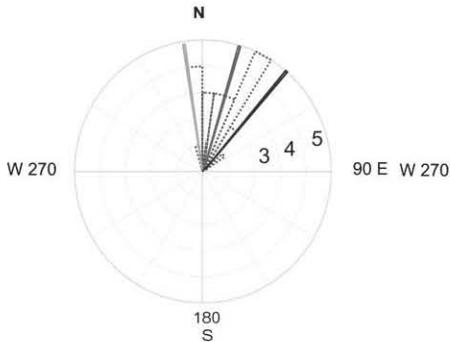
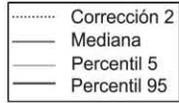
Época II	P5	P50	P95
PCA	-19.8	6.6	21.7
POR I	-14.4	18.6	33.3
POR II	-14.1	17.5	36.6

Yautepec, Morelos

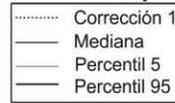
Época III

Fecha: 12/05/2012 - 16/09/2012
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



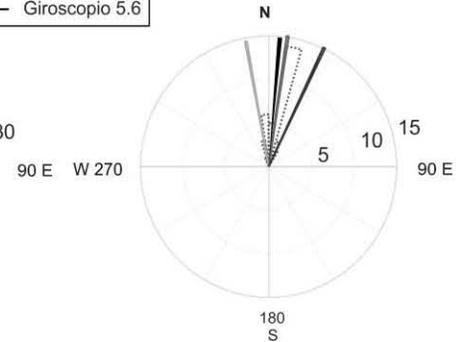
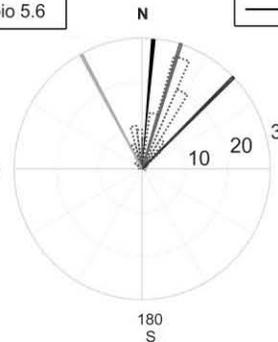
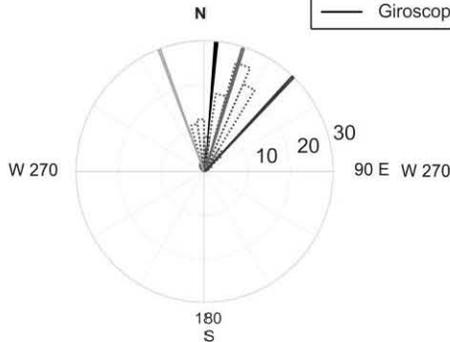
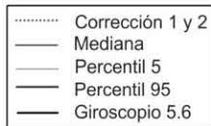
Estimación por medio de Componentes Principales



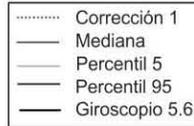
Época IV

Fecha: 16/09/2012 - 10/08/2015
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época III	P5	P50	P95
PCA	-7.6	-3.6	6.4
POR I	0.3	16.3	40.0
POR II	4.9	16.6	41.9

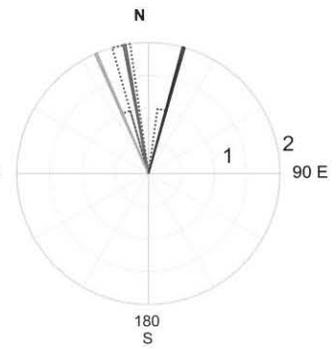
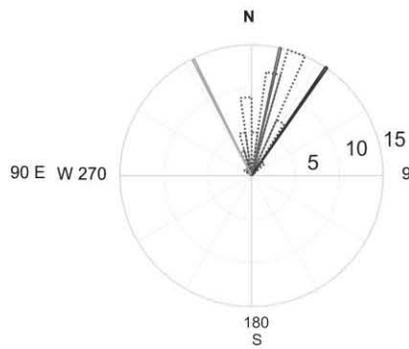
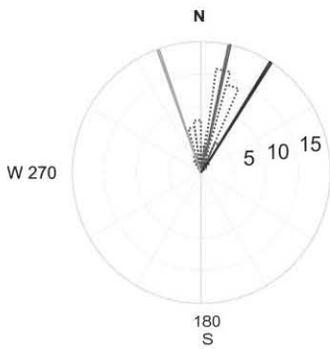
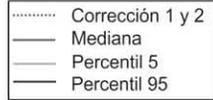
Época IV	P5	P50	P95
PCA	-10.7	8.4	11.1
POR I	-20.1	17.4	43.3
POR II	-28.3	17.5	45.9

Yautepec, Morelos

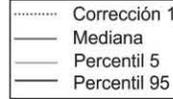
Época V

Fecha: 10/08/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



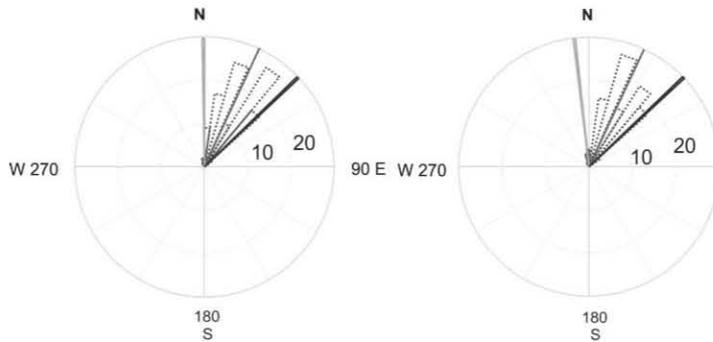
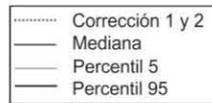
Época V	P5	P50	P95
PCA	-23.3	-10.9	15.2
POR I	-19.5	12.4	32.8
POR II	-26	12.4	34.5

Yozondua, Oaxaca

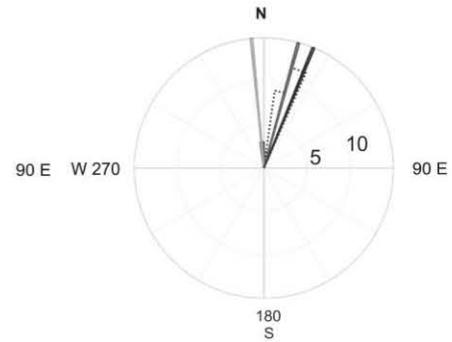
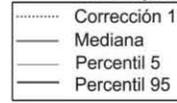
Época I

Fecha: 06/09/2012 - 20/06/2014
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : Trillium 120PA

Estimación por medio de ondas Rayleigh



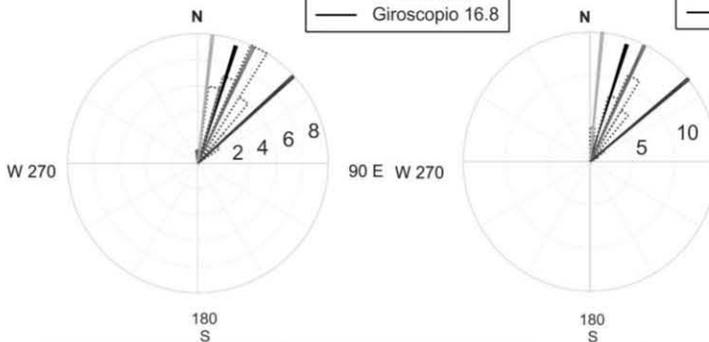
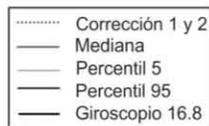
Estimación por medio de Componentes Principales



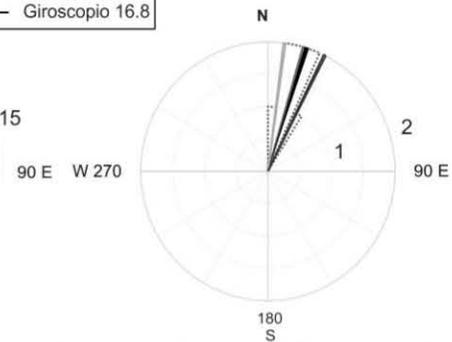
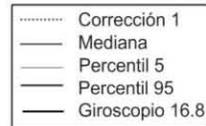
Época II

Fecha: 3/09/2014 - 06/08/2015
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : Trillium 120PA

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-5.34	15.1	22.2
POR I	-0.2	24	46.8
POR II	-6.5	24.3	47.3

Época II	P5	P50	P95
PCA	7.5	16.3	26.2
POR I	6.4	25	50.2
POR II	6.5	25.3	47.4

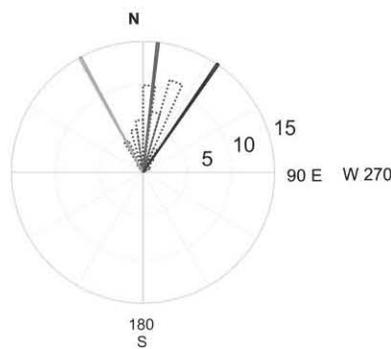
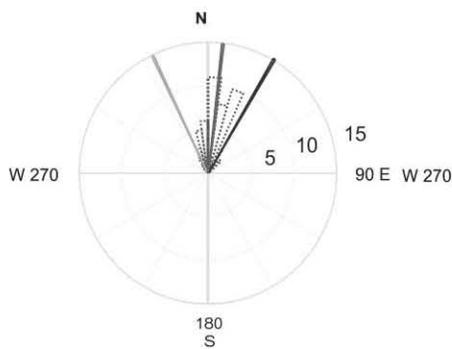
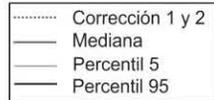
*De 20/06/2014 al 03/09/2014 se instaló un digitalizador Q330S+, no hay eventos suficientes para realizar la estimación.

Yozondua, Oaxaca

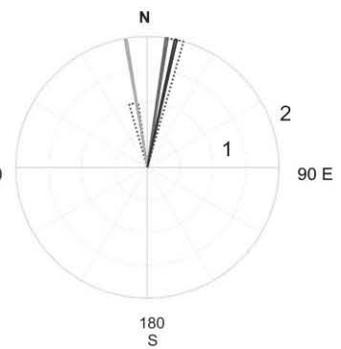
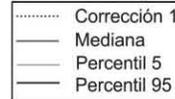
Época III

Fecha: 06/08/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



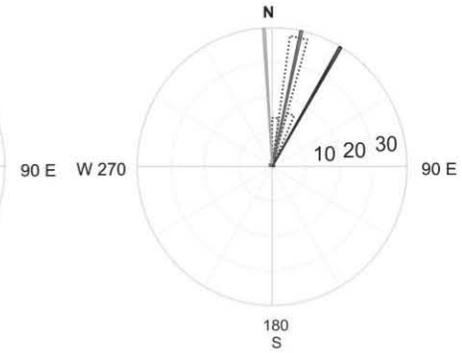
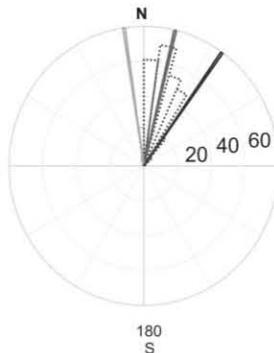
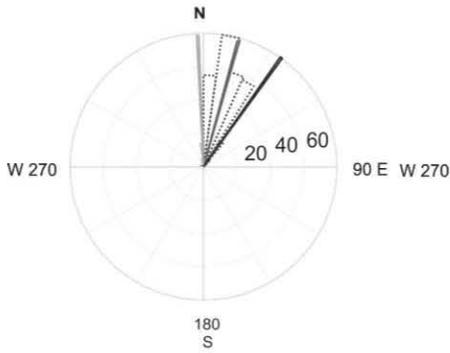
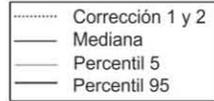
Época II	P5	P50	P95
PCA	-10	8.6	12.1
POR I	-25.9	6.4	30.1
POR II	-28.9	6.5	34.2

Zacatecas, Zacatecas

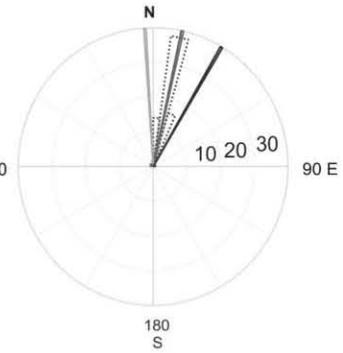
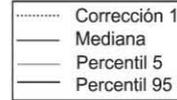
Época I

Fecha: 03/06/2000 - 03/10/2014
 Digitalizador : Q4126
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



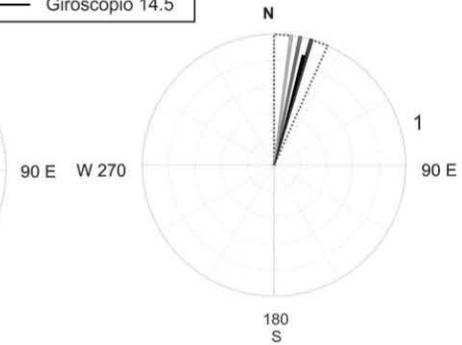
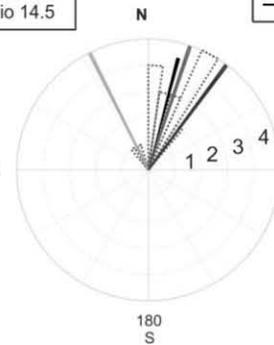
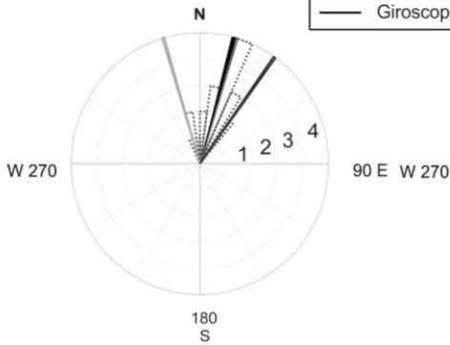
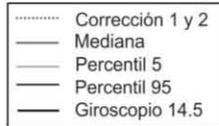
Estimación por medio de Componentes Principales



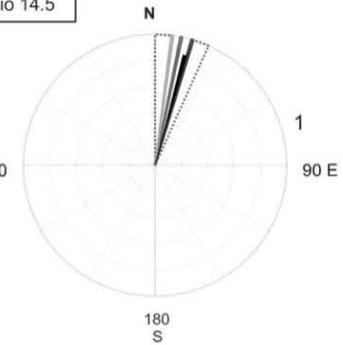
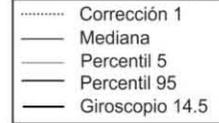
Época II

Fecha: 09/10/2014 - 15/06/2015
 Digitalizador : Q330S+
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-3.30	12.62	30.9
POR I	-2.9	15.2	35.1
POR II	-8.1	13.75	36.1

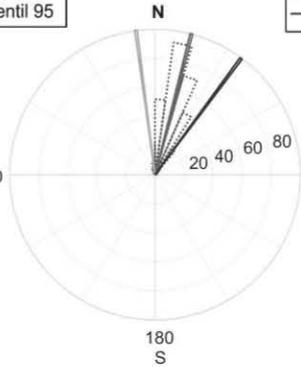
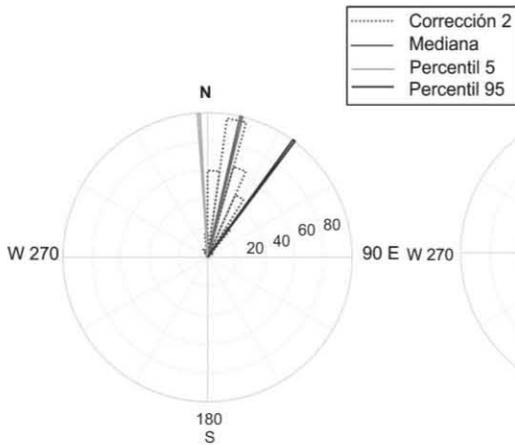
Época II	P5	P50	P95
PCA	7.6	11.8	16.0
POR I	-16.5	16.7	35.3
POR II	-25.2	18.9	36.1

Zihuatanejo, Guerrero

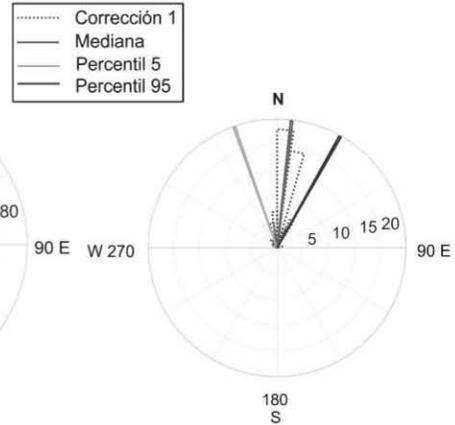
Época I

Fecha: 07/05/2007 - 17/05/2014
 Digitalizador : Q330
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



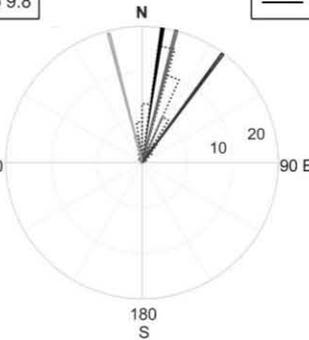
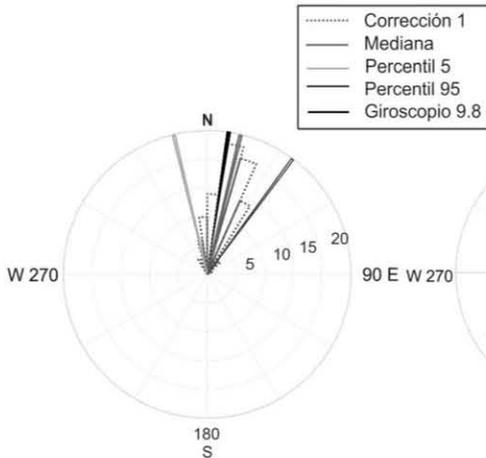
Estimación por medio de Componentes Principales



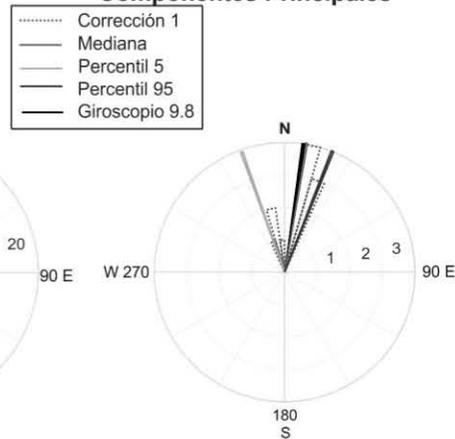
Época II

Fecha: 17/05/2014 - 07/10/2015
 Digitalizador : Q330S
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época I	P5	P50	P95
PCA	-19.34	6.41	29.44
POR I	-3.9	13.8	36.3
POR II	-7.3	14.4	38.6

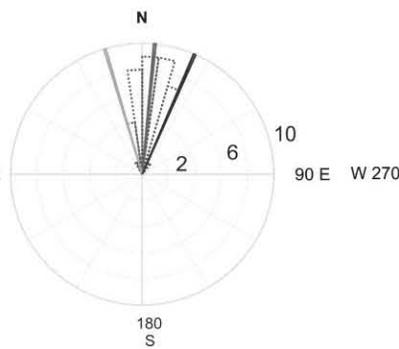
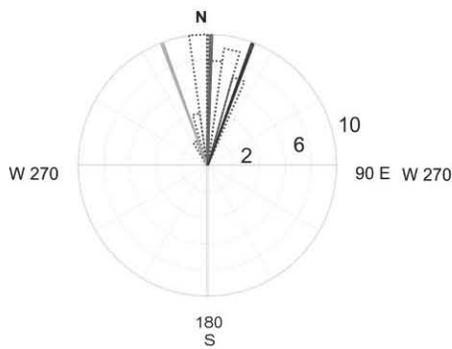
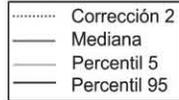
Época II	P5	P50	P95
PCA	-19.8	9.5	21.7
POR I	-14.0	13.72	36.8
POR II	-14.5	14.0	37.5

Zihuatanejo, Guerrero

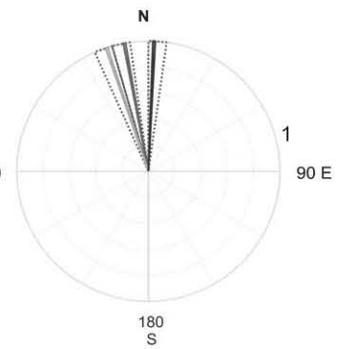
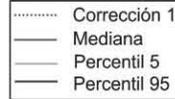
Época I

Fecha: 07/10/2015 - 13/07/2016
 Digitalizador : Q330 S+
 Sensor de velocidad : STS-2 (G1)

Estimación por medio de ondas Rayleigh



Estimación por medio de Componentes Principales



Época II	P5	P50	P95
PCA	-18.5	-10.5	2.6
POR I	-20.0	1.5	20.4
POR II	-16.0	5.2	23