

Universidad Autónoma de Sinaloa
Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio
Facultad de Informática Culiacán
Programa de Posgrado en Ciencias de la Información



Análisis del evento sísmico de 7.2Mw en la sierra de Cucapah, Baja California, México de Abril de 2010, con base en el estudio de la temperatura superficial, lineamientos por esfuerzos y deformaciones de la corteza.

Tesis

Requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias

Presenta:

Arturo Zazueta Gambino

Directores de tesis:

Dr. Manuel Trejo Soto

Dr. Guadalupe E. Vázquez Becerra

Culiacán, Sinaloa, México
2017

“El problema es muy arduo. Hasta ahora nadie ha podido predecir un terremoto y el problema tardará mucho en resolverse. Pero un terremoto no es un fenómeno casual, sino que es un efecto regular y natural de los procesos tectónicos que se verifican en el seno de la Tierra durante largos períodos de tiempo; un terremoto se viene preparando y por lo tanto, tiene sus presagios que tarde o temprano, han de ser revelados por el hombre.” [1]

A mis padres y hermanos

A mi esposa e hijos

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Sinaloa, en especial al programa de posgrado de Ciencias de la Información, por brindarme la oportunidad de pertenecer a él y realizar mi estudio de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado en mi estudio.

A mis directores de tesis, Dr. Manuel Trejo y Dr. Esteban Vázquez, que gracias a su colaboración, orientación y paciencia, han hecho esto posible.

A todos los maestros del núcleo básico, gracias por dedicar parte de su tiempo en contribuir en la mejora académica y cultural de las personas.

A mis compañeros de la maestría por todas las experiencias compartidas, Gaby, Sergio, Pepe, Lidia, Jesús y con una consideración especial a Rosendo que fue para mí, un tutor más para el cumplimiento de este proceso.

A quien fue un padre adoptivo en mi periodo de estudio en Chile, el Dr. Alonso Arellano y su esposa e hija, que me abrieron las puertas de su casa y me permitieron ser parte de su familia durante tres meses. Además de experiencias inolvidables y enriquecedoras, mil gracias.

Al Dr. Lázaro Gambino y al Dr. Roberto Bernal por su gestión en el apoyo económico para el viaje de mi estadía en Santiago de Chile.

A mis amigos, que siempre estuvieron atentos a mí y a mi familia.

A mi papa, mama, hermana y hermanos, a mi esposa e hijos, un millón de gracias.

Índice General

1. Introducción	11
1.2. Planteamiento del problema y justificación	13
1.4. Objetivos	16
1.4.1. Objetivo General	16
1.4.2. Objetivos Específicos.....	16
2. Marco Teórico	17
2.1. Procesamiento digital de imágenes	17
2.1.1 Fundamentos del procesamiento digital de imágenes	17
2.1.2 Métodos de procesamiento digital de imágenes.....	19
2.1.3 Algoritmo de Canny.....	25
2.1.4 Método de Transformada de Hough.....	26
2.2. Imágenes satelitales.....	27
2.2.1. Radiación Electromagnética.....	28
2.2.2. Interacciones de la radiación Electromagnética	30
2.2.3. Obtención de una imagen multiespectral.....	33
2.2.3. Sensores Remotos.....	35
2.3. Sistema satelital de navegación global	39
2.4. Dinamismo de la corteza terrestre.....	43
2.4.1 Teoría tectónica de placas.....	43
2.4.2 Dinámica tectónica de placas.....	45
2.4.3 Teoría del rebote elástico	47
2.4.4 Teoría de los sismos	48
2.4.5 Lineamientos	49
2.5. Calor interior	51
3. Metodología	55
3.1. Metodología General	55
3.2. Área de estudio	56
3.3. Materiales y métodos	61

4. Experimentación y Resultados	72
4.1. Temperatura superficial	72
4.2. Lineamientos	80
4.3. Deformación de la corteza	91
5. Conclusiones y Recomendaciones	95
6. Referencias	97

Índice de Figuras

Figura 1. Etapas fundamentales del procesamiento digital de imágenes [4]	19
Figura 2. Representación de la convolución entre una imagen y una máscara de 3 x 3 [4].....	21
Figura 3. Etapas del algoritmo de Canny [15]	26
Figura 4. Algoritmo para detectar líneas utilizando la Transformada de Hough [36]	27
Figura 5. Señal u onda Electromagnética [34]	29
Figura 6. Espectro Electromagnético [37].....	29
Figura 7. Modelos de dispersión. La rugosidad de la superficie donde se refleja un haz de radiación incidente determina el tipo de reflexión [34]	30
Figura 8. Generación de una imagen digital multispectral a partir de una escena [34].....	34
Figura 9. Representación de explorador de barrido (izquierda) y explorador de empuje (derecha) [38]	35
Figura 10. Representación de órbita geoestacionaria (izquierda) y orbita heliosíncrono polar (derecha) [6].....	38
Figura 11. Segmentos que constituyen al sistema GPS, Segmento espacial (superior izquierda), segmento de control (superior derecha) y segmento de usuario (inferior centro) [40]	39
Figura 12. Principio de diferencias simples (izquierda), principio de diferencias dobles (derecha) [41]	42
Figura 13. Sistema de placas y sus sentidos de desplazamientos predominantes [44].	46
Figura 14. Dinámica de lineamientos extraídos del sismo del 13 de junio de 2005 Arica en Chile [2]	51
Figura 15. Mapa del área de estudio	57
Figura 16. Mapa de la distribución de los eventos sísmicos especificados en la tabla 5.....	58
Figura 17. Carta geológica de la Sierra de Cucapah, escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).....	60
Figura 18. Grafica cronológica de la constelación de satélites Landsat [51]	62
Figura 19. Flujo de procesamiento de datos GAMIT-GLOBK [55].....	69
Figura 20. Mapa con las estaciones de medición CGPS de análisis	70
Figura 21. Mapa con la configuración de las estaciones CGPS de análisis y de referencia.	71
Figura 22. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2008 día: 42. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	72
Figura 23. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2008 día: 74. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	73
Figura 24. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2008 día: 122. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	73

Figura 25. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2009 día: 172. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	74
Figura 26. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2009 día: 220. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	74
Figura 27. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2009 día: 252. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	75
Figura 28. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2009 día: 268. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	75
Figura 29. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2009 día: 348. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	76
Figura 30. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2010 día: 031. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	76
Figura 31. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2010 día: 047. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	77
Figura 32. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2010 día: 079. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	77
Figura 33. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2010 día: 127. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	78
Figura 34. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2010 día: 191. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	78
Figura 35. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2011 día: 114. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.	79
Figura 36. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 4. Escena año: 2008 día: 42, año: 2008 día: 74, año: 2008 día: 122. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.	81
Figura 37. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 4. Escena año: 2009 día: 172, año: 2009 día: 220, año: 2009 día: 252, año: 2009 día: 268, año: 2009 día: 348. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.	82

Figura 38. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 4. Escena año: 2010 día: 31, año: 2010 día: 47, año: 2010 día: 79, año: 2010 día: 127. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.	83
Figura 39. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 4. Escena año: 2010 día: 191, año: 2011 día: 114. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.....	84
Figura 40. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 5. Escena año: 2008 día: 42. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.	84
Figura 41. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 5. Escena año: 2008 día: 42, año: 2008 día: 74, año: 2008 día: 122, año: 2009 día: 172, año: 2009 día: 220. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.	85
Figura 42. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 5. Escena año: 2009 día: 252, 2009 día: 268, año: 2009 día: 348, año: 2010 día: 31. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.	86
Figura 43. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 5. Escena año: 2010 día: 47 año: 2010 día: 79, año: 2010 día: 127, año: 2010 día: 191, año: 2011 día: 114. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.	87
Figura 44. Variación de cantidad de pixeles de lineamientos a lo largo de la serie de tiempo.....	88
Figura 45. Serie de tiempo para la estación CGPS MEXI (Mexicali, BC).....	92
Figura 46. Serie de tiempo para la estación CGPS P500 (El Centro, CA).....	93
Figura 47. Serie de tiempo para la estación CGPS P494 (El Centro, CA).....	93
Figura 48. Serie de tiempo para la estación CGPS P066 (Jacumba, CA)	94

Índice de Tablas

Tabla 1. Principales procesos de dispersión de la radiación electromagnética por la atmósfera [34]	31
Tabla 2. Principales mecanismos de interacción radiación-materia en las regiones del espectro [34]	32
Tabla 3. Características de los sensores Landsat 5 TM y Aster-Terra	37
Tabla 4. Origen del calor en el interior de la Tierra y lugar donde se genera [47]	52
Tabla 5. Sismos de una magnitud ≥ 5 Mw, en un radio aproximado de 25 Km del área de estudio de la sierra de Cucapah para un periodo de Enero de 2008 a Diciembre de 2011	57
Tabla 6. Constantes de calibración de la banda térmica para el Landsat 5 y 7 [48]	63
Tabla 7. Radiancia espectral, $L_{MIN\lambda}$ y $L_{MAX\lambda}$ watts/(m ² * ster * μ m) [47]	64
Tabla 8. Principales parámetros de configuración y consideraciones de ADALGEO [18]	65
Tabla 9. Listado de imágenes Landsat 5 TM para análisis de temperatura y lineamientos	67
Tabla 10. Estaciones de medición CGPS	70
Tabla 11. Estaciones de referencia CGPS	71
Tabla 12. Valores de parámetros especificados para la extracción de lineamientos	80
Tabla 13. Relación entre la magnitud y amplitud de un sismo	89
Tabla 14. Velocidades de las estaciones en la serie de tiempo tratadas	92

1. Introducción

Fenómenos geológicos y geofísicos moldean día a día la superficie de nuestro planeta. Estas actividades transformantes se acentúan en los borde de placas donde producen liberaciones de energía que reflejan las fuerzas y dinámicas que se desarrollan en el interior del planeta. Estos fenómenos naturales en algunos casos por sus características pueden ser considerados peligrosos. El determinar el comportamiento de un fenómeno categorizado como peligroso con una precisión y exactitud que permita tomar decisiones adecuadas, puede llegar a resultar una tarea muy compleja y poco factible, pero necesaria cuando este se encuentra aunado a una zona humana.

Una de estas manifestaciones son los sismos, un fenómeno que provoca la vibración de la corteza terrestre, producida por una rápida liberación de energía, por el desplazamiento de las placas y la fricción entre estas. A pesar de ser un fenómeno muy estudiado a lo largo de la historia, no existe el conocimiento para determinar con precisión y exactitud su gestación y menos aún su manifestación. Sin embargo con la aparición y progreso de las tecnologías espaciales se ha posibilitado el análisis de la dinámica de la corteza terrestre de manera única, que asociado a técnicas matemáticas y computacionales, han podido detectar evidencias de acumulación de esfuerzos, que pudieran proveer resultados alentadores en dicha búsqueda [2] [3].

Los métodos de posicionamiento basados en el Sistema Satelital de Navegación Global (GNSS), es la técnica más utilizada para determinar la ubicación de un punto sobre la superficie terrestre. A su vez las estaciones de medición continua GNSS permiten tener la historia ininterrumpida de las deformaciones en el sitio. En el caso de áreas sísmicamente activas, en la que se manifiestan deformaciones de la superficie terrestre por consecuencia de esta actividad, el monitoreo continuo sobre la zona, provee datos que permiten caracterizar los patrones de deformación y su relación con la sismicidad.

Imágenes proporcionadas por sensores en satelitales, permiten caracterizar diversas áreas terrestres en distintos rangos del espectro electromagnético de la imagen, que posibilitan discriminar elementos y encontrar características que para la visión humana resultan imposibles. La aplicación de técnicas de tratamiento digital de imágenes [4] potencializan dichas cualidades, lo que resulta una gran base de información para estudios de diversos índoles de las áreas caracterizadas. Dentro de estas posibilidades de estudio, se encuentra el análisis de la dinámica sísmica, puntualmente en la propuesta de la concentración de lineamientos por esfuerzos, asociados a la acumulación y liberación de esfuerzos antes y después de un sismo, mediante operaciones digitales sobre las imágenes satelitales del área de investigación.

El Valle de Mexicali se encuentra en una zona tectónicamente activa con un alto índice de sismicidad, debido al movimiento relativo de las placas Pacífico y Norteamérica. El 4 de abril de 2010, ocurrió un sismo de magnitud 7.2 Mw [5], unos de los más fuertes registrados en la zona, provocando importantes rompimientos en superficie y actividad hidrotermal, que expone la interacción entre distintos procesos geológicos y geofísicos en el borde de placas. Estas manifestaciones se observaron de manera evidente a lo largo de la Sierra de Cucapah, la cual al ser una zona de suelo pobre, de mínima vegetación y actividad humana, se presenta como un observatorio ideal para el análisis del evento sísmico de 7.2 Mw.

El área de estudio es la Sierra de Cucapah y la propuesta de investigación radica, en la utilización de imágenes satelitales multiespectrales, para extraer información sobre la acumulación de esfuerzos manifestados en la concentración de lineamientos, la cuantificación de la temperatura superficial con relación a las manifestaciones geotérmicas de la zona, así como las deformaciones o desplazamientos en la superficie de la corteza detectados por las estaciones de medición continua GNSS. Todo ello, con el objetivo de caracterizar cada una de estas variables en un periodo de tiempo, y poder inferir su relación con evento el sísmico del 4 de abril de 2010, en el Valle de Mexicali.

1.2. Planteamiento del problema y justificación

La inquietud para contribuir en una solución que permita determinar la manifestación de un evento sísmico es constante y surgen diversas propuestas para ello. Unas de tantas variantes sobre esta línea investigación han sido las mediciones de las variaciones de los tiempos de propagación de las ondas sísmicas de compresión (P) y de corte (S), los cambios del nivel del agua subterránea, emisión de Radón, la mejora de los flujos de neutrones, anomalías en la Ionosfera [6]. A diferencia de los trabajos mencionados y teniendo en cuenta la dinámica natural de la sismicidad, es posible deducir evidencias en la formación del fenómeno geológico, con base en la búsqueda de los procesos deformantes, los cuales se concentran en las zonas con mayor tensión entre las placas. La detección de estos puntos, es realizada por mediciones directas sobre la superficie terrestre [7], mediante el establecimiento de estaciones de medición por campañas o permanente de una red GNSS o con técnicas de mediciones indirectas, como el procesamiento de imágenes satelitales con software especializado.

El uso de imágenes satelitales, permite visualizar grandes extensiones territoriales con sus lineamientos y estructuras geológicas visibles. Satélites multiespectrales y con sensores de alta resolución espacial, son especialmente utilizados para el análisis de la superficie terrestre, entre los cuales se puede citar los Terra (Aster, Modis) y Landsat [8] [9] [10] [11]. La aplicación de técnicas matemáticas sobre estas imágenes, permiten detectar, discriminar y manipular sus datos para encontrar información particular en ella, posibilitando la creación de un mapa estructural de la zona de una manera más clara y precisa así como su dinámica en un determinado intervalo de tiempo.

Lineamientos definidos como rasgos rectilíneo o ligeramente curvado de la superficie terrestre, son utilizados en la exploración de recursos como agua subterránea, hidrocarburos, minerales y fuentes de energía geotérmica, así como en los mapas de riesgo

de susceptibilidad de los terremotos y deslizamientos de tierra [10]. Los lineamientos encontrados en los límites de las cuencas tectónicas y placas han sido acogidos para su estudio en diversos trabajos de investigación [2] [12] [13], los cuales han establecido una relación entre la concentración de lineamientos y el acontecimiento de un sismo, ya que estas características son interpretadas como la acumulación de tensión en la corteza terrestre que requiere en un punto de tiempo ser liberada. Dichos lineamientos son obtenidos de escenas observación de manera digital, y parten de la configuración de lineamientos geológicos de la zona, donde su configuración se ve modificada en un incremento importante en el número de lineamientos digitales antes de un sismo y posteriormente una disminución gradual hasta retornar a un número similar a su estado inicial, sin que ello esté relacionado con un aumento y disminución de los lineamientos geológicos de la zona en el periodo de observación.

Dentro de los trabajos de análisis de extracción de lineamientos se presentan diversas propuestas de algoritmos para su tratamiento como Laplace, Sobel, Canny, Edge Detection and Image Segmentation System (EDISON), Segment Tracing Algorithm (STA), Transformada de Hough [8] [14] [15] [16] [17] [18] [19]. Entre las aplicaciones computacionales desarrolladas, en el análisis la literatura se menciona : The Lineament Extraction and Stripes Statistic Analysis (Análisis estadístico de extracción de lineamientos y líneas) LESSA [20], el software para el análisis de la longitud y densidad de los lineamientos LINDENS [21], Analysis of the Lineament Patterns for Geophysical and Geological Purposes (análisis de los patrones de lineamiento para fines geofísicos y geológicos) ADALGEO [18].

El reconocimiento de zonas de alteración hidrotermal es una de las aplicaciones de los sensores remotos multiespectrales, con el principal objetivo del reconocimiento de yacimientos con depósitos comercialmente explotables asociados a este fenómeno [20] [21] [22]. La Tierra en si misma es una fuente de calor, y las características que presenta el transporte del calor en el interior de la Tierra determinan los fenómenos geológicos que se

observan en la superficie. Entre estos encontramos las manifestaciones termales superficiales como suelos calientes, vaporizantes, fumarolas, las cuales presentan una distribución en la superficie relacionada principalmente con zonas de actividad tectónica.

Estaciones de medición continuas GNSS, generan datos suficientes para establecer mediante modelos de procesamiento ya sea Procesamiento Puntual Preciso o Posicionamiento Diferencial, una cuantificación y caracterización de las deformaciones presentes en el área monitoreada. Numerosas investigaciones han evaluado de esta manera las velocidades de las deformaciones por la dinámica natural del desplazamiento de las placas, así como las causadas por grandes sismos [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32].

Comprender el fenómeno sísmico, con base en la dinámica de la tectónica de placas, demanda modelos que logren caracterizar, correlacionar y cuantificar comportamientos presentes en su dinamismo, el cual posee propiedades variables de una zona a otra. El presente trabajo de investigación, está centrado en dicha encomienda, considerando un determinado evento sísmico en un área específica y determinadas variables, que permitan generar una caracterización y con ello un mayor entendimiento de la dinámica de la zona.

México, es un país muy activo sísmicamente, ya que en su territorio cuenta con la interacción de cinco placas tectónicas: Norteamérica, Cocos, Pacífico, Rivera y Caribe, razón de la alta ocurrencia de sismos en el país [33]. Por lo que se requiere de un constante monitoreo de dicho fenómeno, estableciendo para ello el Servicio Sismológico Nacional (SSN), el cual establece medidas de prevención y zonas de riesgo cuando se detecta un sismo, así como la generación y almacenamiento de información y estadística relacionada con cada sismo medido. Adicionar a estas mediciones nuevas variables que permitan caracterizar la sismicidad de la zona y posibiliten mediante el establecimiento de una serie de indicadores tomar decisiones preventivas sobre fenómenos sísmicos de magnitudes importantes, que pudieran generar afectaciones en zonas urbanas, resulta algo imperioso,

por ello ante la necesidad de seguir buscando como contribuir en dicho objetivo, es que se plantea un análisis de la zona del valle de Mexicali con base en el sismo de abril de 2010.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Analizar la dinámica de la zona en relación con la actividad sísmica en una serie de tiempo, con base en el estudio de la temperatura superficial, lineamientos por esfuerzos y deformaciones de la corteza.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar y analizar los lineamientos por esfuerzos mediante el procesamiento de imágenes Landsat 5 TM.
- Calcular la temperatura superficial mediante el análisis de imágenes Landsat 5 TM.
- Evaluar y representar la deformación en la zona de la sierra Cucapah mediante el procesamiento de datos GNSS.
- Establecer e interpretar la relación de los resultados del análisis de cada una de las variables de estudio: lineamientos por esfuerzos, deformaciones y temperatura superficial con el fenómeno sísmico de 7.2 Mw de 2010 en Baja California, México.

2. Marco Teórico

2.1. Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento de imágenes tiene como objetivo mejorar el aspecto de las imágenes, cuantificar las propiedades de los objetos en la escena y diferir determinadas características que se desean apreciar. En la siguiente sección se describirán ciertos elementos básicos del tratamiento digital de imágenes y algunas técnicas que serán aplicadas en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

2.1.1 Fundamentos del procesamiento digital de imágenes

Una imagen se refiere a una función bidimensional de intensidad de luz (x, y) , donde x e y representan las coordenadas espaciales y el valor de f en un punto cualquiera es proporcional al brillo o nivel de gris de la imagen en ese punto. Una imagen digital, es una imagen $f(x, y)$ que se ha discretizado, convirtiéndola en una matriz cuyos índices de fila y columna identifican un punto de la imagen y el valor del correspondiente elemento de la matriz indica el nivel de gris en ese punto denominado pixel [4].

El tratamiento o procesamiento de imágenes digitales consiste en la manipulación, mejoramiento y extracción de información de las imágenes naturales con el uso de computadores o sistemas digitales. Surgió inicialmente como aplicación de procedimientos matemáticos tendientes a corregir las fotografías y mejorar o facilitar su interpretación. Posteriormente, con el desarrollo de la tecnología y la aparición de nuevos sensores de imágenes, procedimientos computacionales y algoritmos matemáticos o estadísticos, los procesos se fueron sofisticando y generalizando por los menores costos de hardware y software y hoy en día permiten, no sólo la mejora de imágenes para interpretación visual humana, sino también su interpretación computacional desasistida o semi-asistida, en

campos tales como: teledetección, robots industriales para montaje e inspección, reconocimiento de objetivos militares, procesamiento de huellas dactilares, análisis de muestras de sangre y radiografías, predicción del tiempo atmosférico y de las cosechas, microscopía, reconocimiento de caracteres, entre otros más.

El procesamiento digital de imágenes, como se describe en [4] y se muestra en la Figura 1, se divide en cuatro etapas:

La primera etapa del proceso es la adquisición de una imagen digital, para ello se necesita un sensor de imágenes y la posibilidad de digitalizar la señal producida por el sensor.

La segunda etapa es el pre-procesamiento de la imagen obtenida, en la cual se tiene como función básica mejorar la imagen, con técnicas como mejoramiento del contraste, aislado y eliminación de ruido, de forma que aumenten las posibilidades de éxito en los procesos posteriores.

La siguiente etapa es la segmentación que consiste en dividir una imagen en las partes que la constituyen u objetos, que puede plantearse en la definición dada por [31], como la partición de una imagen en regiones que pueden o no tener un significado relativo a la escena respectiva. Después del proceso de segmentación es necesario convertir los datos en una forma adecuada para el procesamiento por computadora, generando para ello una representación y posteriormente una descripción que consiste en extraer rasgos con una información cuantitativa de interés o que sean fundamentales para diferenciar una clase de objeto de otro.

La cuarta y última etapa incluye el reconocimiento e interpretación. El reconocimiento es el proceso que asigna una etiqueta a un objeto basándose en la información proporcionada por sus descriptores. La interpretación implica asignar significado a un conjunto de objetos identificados. Además dentro de este proceso existe la interacción con la entidad de base de conocimiento, que se define como la codificación del conocimiento sobre el dominio del problema en un sistema de procesamiento de imágenes. Que permite guiar la operación de

cada módulo, la interacción entre estos y la retroalimentación en la realización de tareas de tratamiento de imágenes.

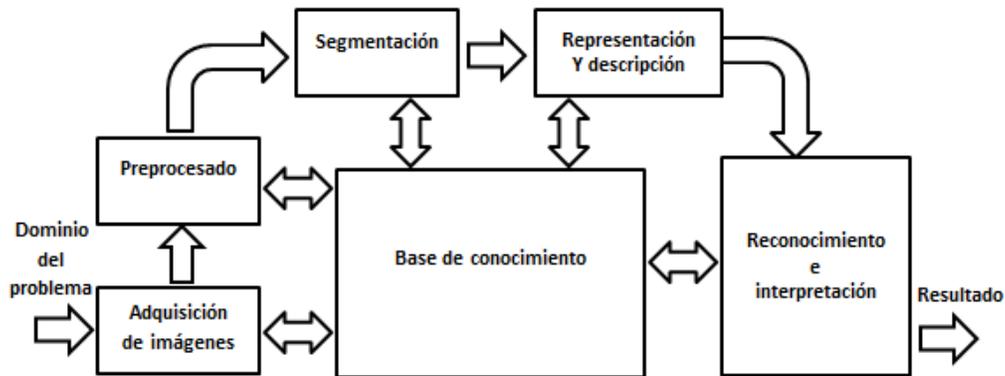


Figura 1. Etapas fundamentales del procesamiento digital de imágenes [4]

2.1.2 Métodos de procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes consiste en la manipulación, mejoramiento y extracción de información de las imágenes digitales a través del uso de herramientas computacionales. Su objetivo fundamental es obtener, a partir de una imagen original, otra final cuyo resultado sea más adecuado para una aplicación específica [4].

Dentro del tratamiento se implementan transformaciones geométricas y radiométricas. Las transformaciones geométricas, modifican la geometría de la imagen, es decir, la ubicación de los píxeles dentro de la misma, pero no se alteran los valores de los píxeles. Las transformaciones radiométricas los valores de nivel de gris de los píxeles son alterados sin modificar la geometría de la imagen.

Las transformaciones radiométricas tienen grandes implicaciones en la identificación o clasificación de elementos, con algoritmos procesamiento de tipo puntual y espacial. Las operaciones de dominio espacial, o también llamado filtros de dominio espacial, operan por medio de la utilización de matrices o máscaras también llamados kernel u operadores matriciales que recorren toda la imagen centrando las operaciones sobre los píxeles que se

encuadran en la región de la imagen original que coincide con la máscara. La operación se realiza para cada uno de los píxeles de la imagen original, ponderando sus píxeles vecinos en función de los coeficientes de las máscaras. Es decir, cada píxel de la imagen de salida es el resultado de la influencia de su vecindad en la imagen de entrada, esta influencia está dada por el diseño de la máscara y puede utilizarse para atenuar o enfatizar características de las imágenes. La Figura 2, ejemplifica una ejecución común de estos procedimientos, con la convolución entre una imagen y una máscara de 3 x 3.

Existen dos tipos de filtros de dominio espacial que pueden realizarse sobre imágenes discretas, filtros no lineales y lineales. Los filtros no lineales, consideran los valores de los píxeles de una vecindad, pero no operan o convolucionan directamente los valores de los píxeles, sino que toman decisiones en función de sus valores para la asignación del valor del píxel de salida. Los filtros lineales se realiza operando los valores de los píxeles que abarca la vecindad dada por la máscara en la imagen de entrada, esta operación se denomina convolución y puede utilizarse atenuar o enfatizar rasgos específicos.

Son diversos los filtros que se usan para mejorar algunos aspectos de las imágenes en general. Los filtros más comunes se caracterizan por atenuar o acentuar características de la imagen. Pueden encadenarse o crearse secuencias de filtros para crear algoritmos más complejos. Los filtros de atenuación, también denominados como filtros de suavizado o de pasa baja, son utilizados para eliminar ruido o detalles de poco interés puesto que solo afecta a zonas con muchos cambios. La frecuencia de corte se determina por el tamaño de la máscara y sus coeficientes, empleando para ello diversos mascarar como la media, mediana, gaussiano y filtros adaptativos.

En la media, el píxel de salida será el promedio de valores comprendidos en la vecindad que abarca el kernel, dado que se realiza una aproximación del promedio de todos los valores de la vecindad, provocaría que la imagen de salida sea una versión más de la original, pero con menos ruido, mientras más grande el kernel, mayor será el efecto de imagen borrosa. La mediana, el píxel de salida será el valor de la media del conjunto de píxeles

pertenecientes a la vecindad, su aplicación entrega una imagen de salida menos borrosa que el filtro de la media y es efectivo atenuando el ruido de píxeles aislados o pequeños elementos no deseados en la imagen. Gaussiano es la aplicación de un kernel generado a partir de una aproximación a la distribución Gaussiana, con valores discretos. Es efectivo atenuando ruido de todo tipo y sobre todo el ruido gaussiano, que produce pequeñas variaciones en la imagen. Y los filtros adaptivos, este tipo de filtros es comprende una máscara de valores variables, los que son recalculados por cada píxel en la imagen, son los usados para normalizar los valores de la imagen, considerando un factor de contraste variable que depende de la vecindad.

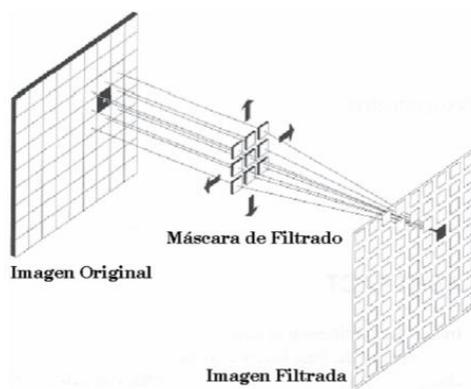


Figura 2. Representación de la convolución entre una imagen y una máscara de 3 x 3 [4]

Los filtros de realce, también llamados filtros de pasa alta, están diseñados para intensificar los detalles, bordes y cambios de alta frecuencia, mientras que atenúa las zonas de tonalidad uniforme. Esto permite resaltar aquellas características de la imagen que por causa del mecanismo de obtención, han quedado ocultos en la imagen o también para realizar una mejor identificación posterior de los objetos que se encuentren en la imagen puesto que el brillo se hace mayor en las zonas con frecuencias más altas, al mismo tiempo que se oscurecen las zonas de frecuencias bajas. Al contrario que los filtros de atenuación que ocultan pequeños detalles o perturbaciones en la imagen, los filtros de realce destacan y acentúan el contraste en las discontinuidades o perturbaciones. Entre estos tipos se filtros

se encuentran la detección de discontinuidades, realce de bordes, realce de contraste y filtros de derivadas.

Detección de discontinuidades, operan gracias a la aplicación de máscaras diseñadas para destacar líneas o puntos aislados de la imagen, suelen ser aplicados como filtros direccionales, para destacar las variaciones de contraste en una dirección específica, ya sea horizontal, vertical o angular.

Realce de bordes, son filtros empleados para destacar y resaltar con mayor precisión los bordes que se localizan en una dirección determinada o múltiples direcciones. Trabaja con los cambios de intensidad existentes entre píxeles contiguos y son comúnmente utilizados para obtener los contornos de objetos y de este modo clasificar las formas existentes dentro de una imagen. En este tipo de filtros destacan los métodos de Prewitt, Sobel, Roberts y Laplace por su sencillez y efectividad, los que son operadores dobles o de dos etapas. La detección de bordes se realiza en dos pasos, en el primero se aplica una máscara para buscar bordes horizontales, y en el segundo paso se buscan los verticales, el resultado final es la suma de ambos. Existen filtros más elaborados en el que destaca Canny [15] que se componen de múltiples etapas, pero con mejores resultados. Como estudio de referencia entre distintos algoritmos de realce de bordes para el análisis de características geológica se encuentra en [35].

Los filtros de realce de contraste, están diseñados para realzar o enfatizar las diferencias de contraste en una imagen, se aplica generalmente cuando en una imagen hay poca diferencia entre los niveles de gris de los objetos y el fondo o para mejorar detalles geométricos como la definición de contornos o líneas. El común denominador de estos filtros es que usan máscaras con el valor central positivo y los que lo rodean son negativos o cero.

Los filtros de derivadas, generalmente es computada usando el Laplaciano 2D, dado que la segunda derivada tiene una respuesta fuerte ante detalles como puntos aislados o líneas, por lo que se usa el Laplaciano como kernel para detectar estos tipos de discontinuidad. En el caso de una imagen de un sensor electro-óptico puede usarse para destacar los cambios, que se producen entre píxeles contiguos.

El procesamiento puntual, está constituido por operaciones punto a punto que son aquellas que se aplican a todos y cada uno de los píxeles que forman la imagen. Se trata de operaciones sencillas que producen como resultado el cambio de valor de gris de cada uno de los píxeles y se realizan sin tener en cuenta los píxeles vecinos, como lo son aplicaciones de amplitud de contraste, umbralización, pseudocolor, operaciones aritméticas entre imágenes. Estos algoritmos son de sencilla implementación, de bajo costo computacional y ampliamente usados en imágenes de percepción remota, dado su potencial para mejorar el contraste en imágenes pancromáticas y segmentar elementos basados en el contraste de las distintas bandas del sensor.

Las operaciones aritméticas, son el tipo de operaciones sobre los valores individuales de una imagen, que involucran la operación directa de funciones aritméticas, las más simples involucran la suma, resta, multiplicación o división de una constante a cada uno de los píxeles de la imagen. Además de la operación de un valor constante, también se pueden realizar operaciones matemáticas entre dos imágenes, operando ambas píxel a píxel. En el caso de la operación entre imágenes, es ideal que ambas tengan las mismas dimensiones, ya que de no ser así, se deberá considerar solo una parte de la imagen más grande para ser operada contra la más pequeña. Cualquiera de las cuatro operaciones aritméticas básicas es aplicable y podemos multiplicar o dividir una imagen por un valor escalar o dos imágenes píxel a píxel, igual que podemos sumarlas o restarlas. Una aplicación común de este tipo de operaciones entre dos imágenes, es la que se hace para la detección de diferencias entre imágenes, es decir, enfatizar las zonas en las cuales dos imágenes aparentemente iguales, difieren. El fundamento de esta operación se encuentra en que, al restar dos imágenes

idénticas, píxel a píxel, el resultado de la diferencia es cero, con lo cual únicamente en aquellos píxeles en los que se encuentren diferencias, se producirán píxeles con valores distintos de cero, ya sean negativos o positivos.

El histograma de una imagen es una gráfica que indica la cantidad de píxeles en la imagen que corresponden a determinado valor de la escala de grises. El histograma de una imagen solo especifica el número total de píxeles correspondientes a cada nivel de gris y no proporciona información acerca de la distribución espacial de los mismos.

Dentro de la manipulación del histograma de una imagen está el mejoramiento del contraste; es una transformación radiométrica puntual, cuyo objetivo es lograr una mejor discriminación de imágenes con bajo contraste. Consiste en una reasignación del nivel de gris de los píxeles sin considerar los niveles de gris de los píxeles adyacentes y puede realizarse por un reescalado del histograma, una normalización de histograma o ecualización de histograma. En el caso del reescalado, la operación consiste en cambiar la escala del rango de valores de la imagen, considerando para esto dos umbrales uno máximo y uno mínimo, estos umbrales serán los extremos de una tabla de reasignación de niveles de gris, los píxeles de la imagen con valores superiores al umbral máximo serán 255 y los con valores menores al mínimo serán cero, los valores intermedios se reasignaran dependiendo de su valor en 253 posibles niveles. Para la normalización de histograma, la operación amplía el rango de valores de gris de la imagen, para que llegue a ocupar todos los niveles de gris de manera proporcional, mantiene el rango de valores entre cero y 255, realizando el contraste sin la utilización de umbrales. La ecualización de histograma, en donde, a diferencia de la normalización, redistribuye el valor de gris de los píxeles, considerando una cantidad uniforme de píxeles por rango de frecuencia, es decir altera el valor de cada píxel, para que cada rango de gris tenga una cantidad similar de píxeles en la imagen.

2.1.3 Algoritmo de Canny

Algoritmo propuesto por John Canny en 1986 [15], el cual mediante el manejo de máscaras de convolución y basado en la primera derivada establece una serie de criterios para obtener los borde de una imagen. Las etapas fundamentales del algoritmo son la reducción de ruido en la imagen, la obtención del gradiente, supresión no máxima e histéresis de umbral. Esto se ilustra en la Figura 3.

La reducción de ruido en la imagen se efectúa mediante un filtrado de convolución de la primera derivada de una función gaussiana sobre la imagen, realizada en dos direcciones: horizontal y vertical.

La obtención del gradiente, consiste en el cálculo de la magnitud y orientación del vector gradiente en cada píxel, generando como salida del proceso dos imágenes correspondientes a cada uno de estos cálculos.

La supresión no máxima genera un adelgazamiento del ancho de los bordes, con la evaluación de las imágenes obtenidas con el gradiente, hasta lograr bordes de un píxel de ancho, para ello se consideran cuatro direcciones identificadas por las orientaciones de 0° , 45° , 90° y 135° con respecto al eje horizontal, para cada píxel que se encuentre en la dirección más aproximada a la dirección del ángulo de gradiente y con la selección del valor pixel cuya magnitud es máxima dentro de una vecindad y descartar aquellos cuyas magnitudes no alcancen ese máximo.

La histéresis de umbral, es una optimización de la decisión llevada a cabo en la etapa anterior, esta función se basa en la definición de dos umbrales, TL y TH, tales que $TL < TH$, con base a los cálculos siguientes: Un pixel de M, $M(i, j)$, se considera borde definitivo si $M(i, j) \geq TH$. Un pixel de M, $M(i, j)$, se considera fondo definitivo si $M(i, j) < TL$. Todos los pixeles en vecindad, de los pixeles considerados como borde definitivo, $M(k, l)$, se consideran también borde definitivo si $M(k, l) \geq TL$.

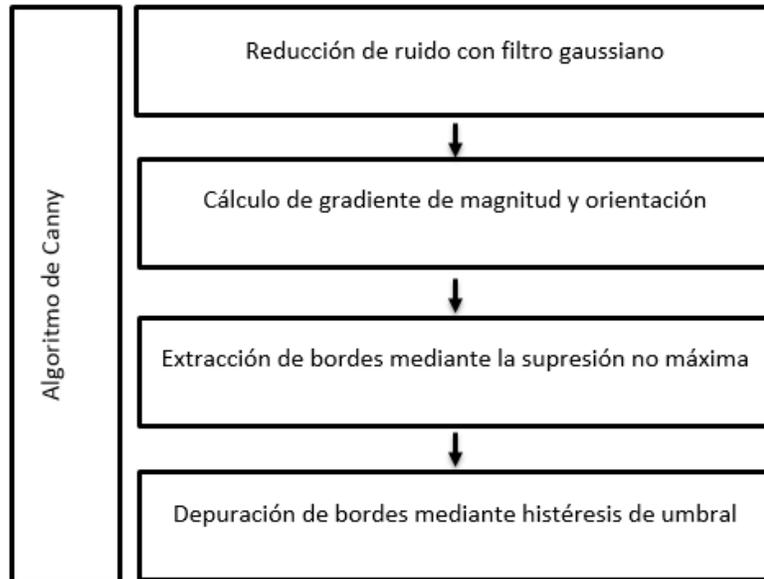


Figura 3. Etapas del algoritmo de Canny [15]

2.1.4 Método de Transformada de Hough

El método de la Transformada de Hough desarrollado por Paul Hough, permite distinguir formas geométricas simples como líneas, círculos o elipses en una imagen. Una línea en un espacio bidimensional es descrita como $y = kx + d$ donde k representa la pendiente y d el punto eje y donde la línea lo intercepta, es decir una línea que pasa por diferentes puntos $p_1 = (x_1, y_1), p_2 = (x_2, y_2)$, satisfice que $y_1 = kx_1 + d, y_2 = kx_2 + d$, donde $k, d \in \mathbb{R}$ [36]. Haciendo la transformación al espacio paramétrico, los valores de k, d quedarán definidos como: $d = y_i - kx_i$ lo que al variar el parámetro k desde $-\infty$ a $+\infty$ se obtendrán los infinitos valores de d en el espacio paramétrico e infinitas rectas.

La transformación de Hough resuelve el problema de detección de líneas, utilizando para la representación de las líneas la ecuación de la recta en forma polar $\rho = x * \cos(\theta) + y * \sin(\theta)$. Consecuentemente una transformación entre el plano imagen (x, y) y espacio de parámetros (ρ, θ) el cual es discretizado. La localización de rectas se fundamenta en encontrar las coordenadas en el espacio de parámetros de Hough en donde varias líneas

tienen cruce. Partiendo con la acción de discretizar el intervalo de valores correspondientes a k y d , sobre los intervalos $[\rho_{min} \rho_{max}]$ y $[\theta_{min} \theta_{max}]$, se efectúa el conteo de los cruces generado por los puntos de intersección de varias rectas en el espacio de parámetros de Hough, el cual es almacenado en una matriz de acumulación en donde cada celda es incrementada en función de la cantidad de rectas que pasan por esa celda. De esta manera los puntos que mantienen un máximo local en el espacio de parámetros de Hough representan los valores k y d que representan a las rectas en el espacio de parámetros de la imagen. La secuencia para la extracción de líneas mediante la Transformada de Hough, es indicada mediante el algoritmo descrito en la Figura 4.

```

Detector de líneas por Transformada de Hough (  $I(x, y)$  )
MRAcc ( $\theta, \rho$ )  $\rightarrow$  Matriz de acumulación
 $(x_c, y_c)$   $\rightarrow$  Coordenadas del centro de  $I(x, y)$ 
1: 0  $\rightarrow$  MRAcc ( $\theta, \rho$ )
2: for todas las coordenadas de la imagen  $I(x, y)$  do
3: if ( $I(x, y)$  es un borde) then
4:  $(x - x_c, y - y_c) \rightarrow (u, v)$ 
5: for  $\theta_i = \theta \dots \pi$  do
6:  $\rho = u * \cos(\theta_i) + v * \text{sen}(\theta_i)$ 
7: se incrementa MRAcc( $\theta, \rho$ )
8: Por último se encuentran los registros MRAcc( $\theta, \rho$ ), cuyos valores sean máximos.

```

Figura 4. Algoritmo para detectar líneas utilizando la Transformada de Hough [36]

2.2. Imágenes satelitales

El desarrollo tecnológico de las últimas décadas ha permitido la generación de imágenes empleando radiación invisible a la visión humana. Las imágenes son adquiridas con gran eficiencia y a resoluciones muy altas, la tecnología ha permitido ampliar nuestra capacidad de ver y analizar el entorno, sensores orbitando el planeta nos permiten indagar de manera remota las propiedades de los cuerpos que emiten o reflejan la radiación.

2.2.1. Radiación Electromagnética

La radiación es la propagación de energía, en una variedad de formas, a través del espacio. La radiación electromagnética es un fenómeno ondulatorio de transporte de energía, formado por un campo magnético y uno eléctrico perpendiculares entre sí, cuya velocidad de desplazamiento en el vacío es de $c = 299,792,458$ m/s. La velocidad de la radiación electromagnética en medios como gases, líquidos o sólidos es diferente a la del vacío; el cociente de la velocidad en el vacío con respecto a la velocidad v en otro medio es llamado el índice de refracción n , es decir $n = c/v$. Al conjunto de los campos magnético y eléctrico se le llama campo de radiación [34]. La radiación electromagnética, siendo un fenómeno ondulatorio, tiene asociada una longitud de onda λ y una frecuencia ν , ambas relacionadas entre sí por la expresión

$$\nu\lambda = c \quad (2.1)$$

La longitud de onda se mide en metros y la frecuencia en Hertz. Además, la velocidad de la luz en el vacío se expresa como

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \quad (2.2)$$

Donde ϵ_0 es la permitividad eléctrica y μ_0 es la permeabilidad magnética. La permeabilidad magnética se define como la razón de la densidad de flujo magnético B , en una substancia, a la intensidad del campo externo H : $\mu_0=B/H$. La permeabilidad del espacio vacío es llamada la constante magnética. La permitividad eléctrica se define como la razón del desplazamiento eléctrico a la intensidad del campo eléctrico que lo produce [34].

Una onda electromagnética tiene asociada una energía dada por

$$E_\nu = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \quad (2.3)$$

Donde $h = 6.6256 \times 10^{-34}$ joules, es la constante de Planck. La ecuación anterior nos indica que a medida que disminuye la longitud de onda aumenta la energía de la radiación. La

radiación electromagnética es por tanto una onda formada por un campo eléctrico y uno magnético oscilando perpendicularmente entre sí, como se muestra en la Figura 5. La radiación electromagnética también es nombrada como señal electromagnética u onda electromagnética [34].

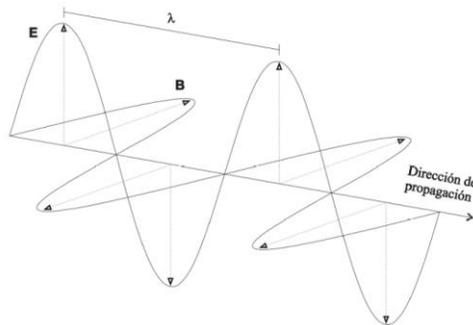


Figura 5. Señal u onda Electromagnética [34]

Al intervalo posible de longitudes de onda que pueden ser situadas las ondas electromagnéticas se le llama el espectro electromagnético. Esta distribución de la radiación electromagnética parte desde longitudes de ondas mínimas de 10^{-13} nanómetros en el caso de la radiación Gamma hasta longitudes mayores 10^5 nanómetros en ondas de radio, como se visualiza en la Figura 6.

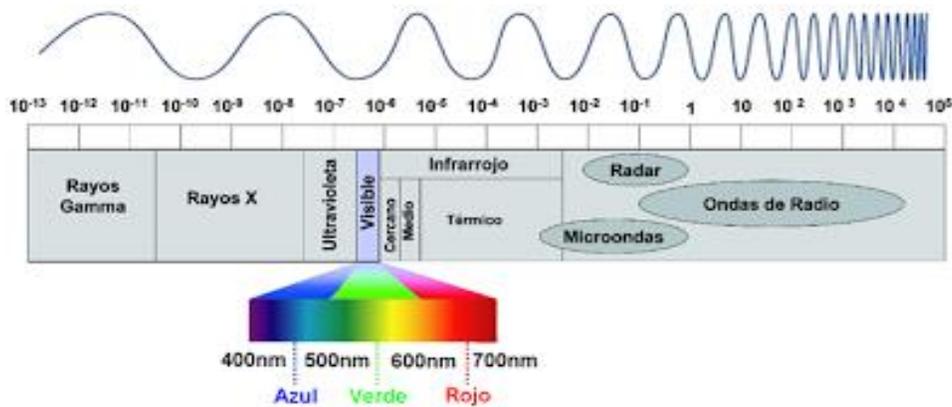


Figura 6. Espectro Electromagnético [37].

2.2.2. Interacciones de la radiación Electromagnética

La interacción de una onda electromagnética con la materia, involucra una variedad de mecanismos que son principalmente dependientes de la frecuencia de la onda y de la estructura de la materia. A medida que la onda interactúa con un cierto material, sea gas, líquido o sólido, los electrones, moléculas y núcleos son puestos en movimiento de rotación, vibración o desplazamiento, lo que conduce a un intercambio de energía entre la onda y la materia. Donde se presentan diversos mecanismos de interacción que pueden ser específicas de la materia o determinadas bajo condiciones geométricas. Dentro de estos mecanismos podemos encontrar los modelos de dispersión ilustrados en la Figura 7.

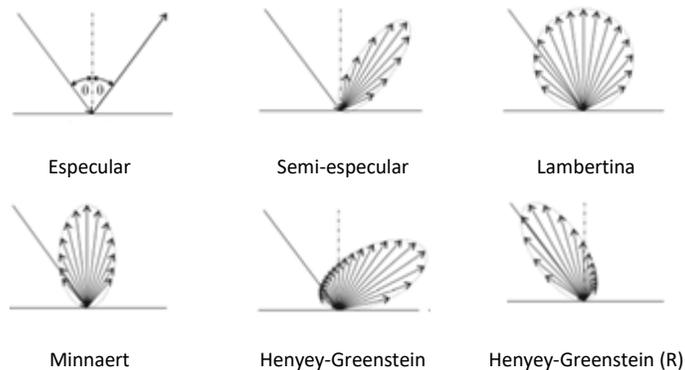


Figura 7. Modelos de dispersión. La rugosidad de la superficie donde se refleja un haz de radiación incidente determina el tipo de reflexión [34]

La interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera terrestre está determinada por las características de la radiación, como son longitud de onda, amplitud, fase y polarización, y las características físicas de la atmósfera, tales como la presión, la temperatura, contenido de humedad y partícula, tales como oxígeno, bióxido de carbono y nitrógeno. La interacción radiación y atmósfera presenta una complejidad en su modelación debido a la naturaleza tridimensional del medio de propagación y a la multiplicidad de los mecanismos de interacción: dispersión, absorción, emisión y refracción [34]. Por lo que a medida que la radiación solar pasa a través de las capas atmosféricas, parte de la energía es absorbida, parte dispersada y parte transmitida. La absorción por parte de la atmosfera

se da de manera selectiva sobre determinadas bandas del espectro electromagnético, lo que imposibilita la exploración por medio de ciertos rangos del espectro, reduciendo la observación espacial solo en aquellas en la que la transmisividad¹ de la atmosfera es importante, lo que se conoce como ventanas atmosféricas. Entre estas se encuentran la del espectro visible e infrarrojo cercano 0.3 a 1.35 μm , infrarrojo medio en rangos de 1.5 a 1.8 μm , 2.0 a 2.4 μm , 2.9 a 4.2 μm y 4.5 a 5.5 μm , infrarrojo térmico de 8.0 a 14 μm y la microondas por encima de los 20 mm .

La dispersión² se produce por la presencia de partículas en la atmósfera, según el tamaño de las partículas se pueden producir los siguientes tipos de dispersión: Dispersión de Rayleigh, cuando el tamaño de las partículas es menor a la longitud de onda. Dispersión de Mie, cuando el tamaño de las partículas es aproximadamente igual al tamaño de la longitud de onda. Dispersión no selectiva, se produce cuando el tamaño de las partículas es mayor a la longitud de onda. Esto se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales procesos de dispersión de la radiación electromagnética por la atmósfera [34]

Proceso de dispersión	Dependencia con la longitud de onda	Diámetro (δ) promedio de las partículas dispersoras	Tipo de partículas
Rayleigh	λ^{-4}	$\frac{\delta}{\lambda} \ll 1$	Moléculas de aire
Mie	$\lambda^0 - \lambda^{-4}$	$\frac{\delta}{\lambda} \approx 0.1 - 10$	Humo, neblina, bruma
No-selectiva	λ^0	$\frac{\delta}{\lambda} \gg 10$	Polvo, nubes

La atmósfera emite longitudes de onda correspondiente a las absorbidas, esta radiación se agrega a la irradiada, reduciendo el contraste de radiación de los objetos. Como el caso de análisis de la banda infrarrojo térmico, ya que al igual que cualquier cuerpo por encima del

¹ Es la relación entre cantidad de radiación transferida con la generada por la fuente. A causa de la dispersión y absorción, no toda la irradiancia solar disponible incide en la superficie terrestre.

² Proceso por el cual la distribución de un haz de radiación es modificada al ser desviado, sobre un hemisferio, por una superficie o un medio. La dispersión depende de la longitud de onda.

cero absoluto, la atmosfera emite su propia energía calorífica, por lo que ese parámetro debe considerarse para estimar la emitancia espectral real proveniente del suelo. Mientras por su naturaleza como un medio gaseoso, en la atmósfera se produce la refracción lo que hace que la propagación de las ondas no sea en línea recta. Estos y otros mecanismos de interacción son citados en la Tabla 2, donde se incluye la columna de aplicaciones, que describe el área de oportunidad de estudio de las distintas regiones del espectro, derivado de las respuestas que se presentan en la interacción de radiación y materia.

Tabla 2. Principales mecanismos de interacción radiación-materia en las regiones del espectro [34]

Región	Mecanismo de interacción	Aplicaciones
Rayos γ	Procesos atómicos	Levantamiento de materiales radioactivos
Rayos X	Procesos atómicos	Levantamiento de materiales radioactivos
Ultravioleta	Procesos electrónicos	Medida de H y He en la atmosfera
Visible	Procesos electrónicos y vibración molecular	Composición química superficial, vegetación, propiedades biológicas
Cercano infrarrojo	Procesos electrónicos y vibración molecular	Composición química superficial, vegetación, propiedades biológicas
Infrarrojo medio	Procesos moleculares de vibración y de vibración-rotación	Composición química superficial
Infrarrojo térmico	Emisión termal, procesos moleculares de vibración y de vibración-rotación	Capacidad calorífica superficial, temperatura superficial
Micro-ondas	Rotacionales, emisión termal, dispersión, conducción	Propiedades físicas superficiales
Radio frecuencia	Dispersión, conducción, efectos ionosfericos	Propiedades físicas superficiales

2.2.3. Obtención de una imagen multispectral

La Teledetección es la técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación remota sea posible, es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Los tres principales elementos de cualquier sistema de teledetección son: sensor, objeto observado y flujo energético que los pone en relación y permite, en última instancia, detectar el objeto [38].

Los sensores de Teledetección son instrumentos que transforman la radiación electromagnética en información perceptible y analizable. Partiendo de la emisión de una fuente de radiación electromagnética, esta interacciona con un elemento físico de la escena llamado campo instantáneo de vista (CIV). El CIV es una sub área o sub región de una escena que se encuentra formando parte del sistema físico; el resultado de la interacción de la radiación con este elemento físico es también radiación, cuya energía o longitud de onda no necesariamente es igual a la que incide originalmente. De acuerdo con la geometría particular: fuente-CIV-detector, una parte de la radiación emitida, reflejada o transmitida por el CIV es captada, sobre un cierto ángulo sólido, por unidad de tiempo, en una dirección predeterminada, por un arreglo de sensores que poseen un subsistema de enfoque y conducción de radiación. Este subsistema puede consistir de un arreglo de lentes y fibras de conducción de luz, cuando la radiación empleada es electromagnética para longitudes de onda de la región óptica del espectro correspondiente. Entonces, la radiación es conducida hasta un grupo de detectores, frente a los cuales se encuentra un conjunto de filtros o un espectroradiómetro, cuya función es seleccionar un conjunto de intervalos de energía $\{\Delta E_1, \Delta E_2, \dots \Delta E_\gamma\}$ o de longitudes de onda $\{\Delta \lambda_1, \Delta \lambda_2, \dots \Delta \lambda_\gamma\}$, para los que cada detector está óptimamente diseñado y calibrado [34]. Este proceso se expone en la Figura 8.

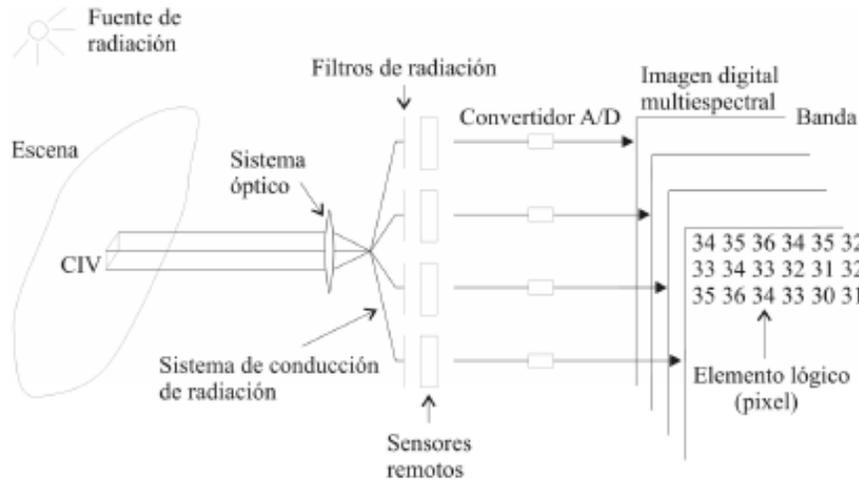


Figura 8. Generación de una imagen digital multispectral a partir de una escena [34]

Para cada intervalo de energía, los detectores miden la cantidad de radiación por unidad de ángulo sólido, por unidad de tiempo; las unidades correspondientes en esta medida son típicamente mW/msterad/s . Los detectores generan un voltaje cuya intensidad es proporcional al resultado de haber integrado la radiación. La señal de voltaje generada por los detectores, a medida que observan un CIV tras otro, se introduce a un convertidor análogo/digital, que la discretiza empleando una escala que usualmente va de 0 a 255, es decir, 256 posibles niveles, generando un 255 para el CIV más brillante de la escena y un 0 para el más oscuro. Si bien otras escalas pueden ser empleadas, esta resolución radiométrica es suficiente para la mayoría de las aplicaciones que existen empleando imágenes digitales. Al utilizar 256 niveles, este número es almacenable en un byte de 8 bits de una computadora digital. Con todo esto queda indicado que la generación de una imagen multispectral implica por tanto dos discretizaciones: una espacial y una radiométrica [34].

La medida de la radiación proveniente de éste, se genera un número cuyo valor se guarda en algún medio de almacenamiento, en una posición lógica que va de acuerdo con el lugar relativo que tiene el CIV correspondiente en la escena. Donde para cada CIV se producen por tanto, Y números que conjuntamente describen su respuesta espectral.

2.2.3. Sensores Remotos

Un sensor es el aparato con la tecnología necesaria para captar la radiación electromagnética a distancia y que es transportado en una plataforma, como lo es un avión o satélite. Los sensores que capturan información desde plataformas satelitales pueden ser pasivos y activos. Los sensores pasivos reciben radiación emitida o reflejada por la Tierra, teniendo como principal fuente las radiaciones producidas por el Sol. Los sensores activos son capaces de generar su propia fuente de radiación, es decir emite una señal y capta los ecos reflejados por los elementos de la superficie. Dentro de los sensores pasivos están los sensores fotográficos, óptico-electrónicos y de antena. Mientras en los sensores activos, se dispone de tecnologías de radar y laser.

En un sistema óptico-electrónico la radiancia recibida por los componentes ópticos se descompone en varias longitudes de onda, cada una de ellas se envía a un conjunto de detectores sensibles a esa región del espectro que la amplifican y la convierten en señal eléctrica y finalmente en un valor numérico conocido como Nivel Digital (ND). Estos valores numéricos pueden convertirse otra vez a valores de radiancia conociendo los coeficientes de calibrado. Existen dos grandes tipos de sistemas óptico-electrónicos: los radiómetros de barrido y los radiómetros de empuje, los cuales son ilustrados en la Figura 9.

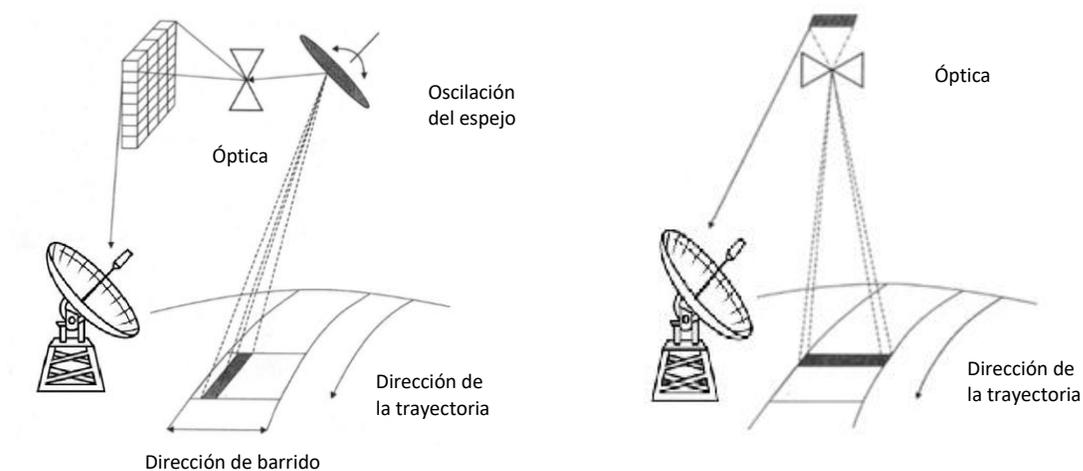


Figura 9. Representación de explorador de barrido (izquierda) y explorador de empuje (derecha) [38]

La resolución de un sensor depende del efecto combinado de sus distintos componentes. El concepto de resolución implica diversos aspectos como el espacial, espectral, radiométrico y temporal.

La resolución espacial designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen, es decir es la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados. Se mide en unidades de longitud de metros y depende de la longitud focal del sensor y su altura sobre la superficie. Esta distancia corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen, denominada pixel.

La resolución espectral indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Con lo que, un sensor entre mayor número de bandas opere, permitirá una mejor caracterización de los rasgos espectrales de la imagen. A la vez, conviene que esas bandas sean estrechas, con objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro, ya que bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio, que puede ocultar características importantes para una mejor interpretación.

La resolución radiométrica se refiere a la capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. En el caso de imágenes de los sensores satelitales, la imagen habitualmente se presenta en formato digital, gracias a una conversión analógico-digital realizada a bordo del satélite, por esto también se habla de niveles digitales. El número de valores que incluye este rango, es decir, el número máximo de niveles digitales de la imagen, suele identificarse como la sensibilidad radiométrica del sensor y se expresa en el número de bits necesarios para almacenar la información de los niveles digitales o niveles de gris.

Actualmente, la mayor parte de los sistemas ofrecen 256 niveles por píxel, es decir, incluyen valores que van de 0 a 255, pero también existen sensores con rangos más amplios o más acotados, así por ejemplo Landsat MSS tiene una resolución espectral de 26 = 64 niveles de gris en el canal 6, AVHRR-NOAA tiene 10 bits con valores de 0 a 1023 o Modis que tiene

valores que van de 0 a 4095 (12bits), cuanto mayor sea la precisión radiométrica, mayor número de detalles podrán captarse en la imagen.

La resolución temporal es la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre, es decir cada cuanto tiempo pasa el satélite por la misma zona de la Tierra. Este tipo de resolución depende básicamente de las características de la órbita.

En la Tabla 3, podemos encontrar las características de resolución presente en los sensores Landsat 5 TM y Aster-Terra, agrupados por los subsistemas de visión.

Tabla 3. Características de los sensores Landsat 5 TM y Aster-Terra

Sensor	Subsistema	Banda No.	Rango Espectral μm (micrometro)	Resolución Espacial	Resolución Radiométrica
Landsat 5 TM	VNIR	1	0.45-0.52 μm	30 m	8 bits
		2	0.53-0.60 μm		
		3	0.63-0.69 μm		
		4	0.76-0.90 μm		
	SWIR	5	1.55-1.75 μm	30 m	8 bits
		7	2.08-2.35 μm		
TIR	6	10.4-12.5 μm	120 m	8 bits	
Aster-Terra	VNIR	1	0.52-0.60 μm	15 m	8 bits
		2	0.63-0.69 μm		
		3N	0.78-0.86 μm		
		3B	0.78-0.86 μm		
	SWIR	4	1.600-1.700 μm	30 m	8 bits
		5	2.145-2.185 μm		
		6	2.185-2.225 μm		
		7	2.235-2.285 μm		
		8	2.295-2.365 μm		
		9	2.360-2.430 μm		
	TIR	10	8.125-8.475 μm	90 m	12 bits
		11	8.475-8.825 μm		
		12	8.925-9.275 μm		
		13	10.25-10.95 μm		
14		10.95-11.65 μm			

Entre los sensores activos, se distinguen el radar SAR y el Lidar, mientras entre los sensores pasivos se destacan sensores multiespectrales como por ejemplo los presentes en la plataforma Aster-Terra y Landsat-TM, hiperespectrales como por ejemplo la plataforma Aviris de la NASA y sensores de muy alta resolución espacial, existentes en las plataformas Spot, Ikonos, Quickbird y Geoeye.

Como se había mencionado anteriormente los sensores son transportados por plataformas, y dentro de estas se encuentran los satélites. Existen dos tipos fundamentales de satélites, los geosíncronos o geoestacionarios y los heliosíncronos, ambos representados en la Figura 10. Los primeros se sitúan sobre el Ecuador en una órbita a 36000 Km de la Tierra. Permanecen siempre en la vertical de un punto determinado acompañando a la Tierra en su movimiento de rotación. Es el caso de Meteosat, situado sobre la perpendicular entre el meridiano 0° y el Ecuador, desde el que se obtienen imágenes de la parte de la Tierra visible desde el punto en que se encuentra.

Los satélites heliosíncronos se desplazan en órbitas generalmente circulares y polares, donde el plano de la órbita es paralelo al eje de rotación de la Tierra, de modo que, aprovechando el movimiento de rotación terrestre, puede captar imágenes de diferentes puntos cada vez que pase por el mismo punto de la órbita. Estas órbitas sólo son posibles entre 300 y 1500 Km de altura. La órbita se diseña de forma que el satélite pasa siempre sobre el mismo punto a la misma hora local.

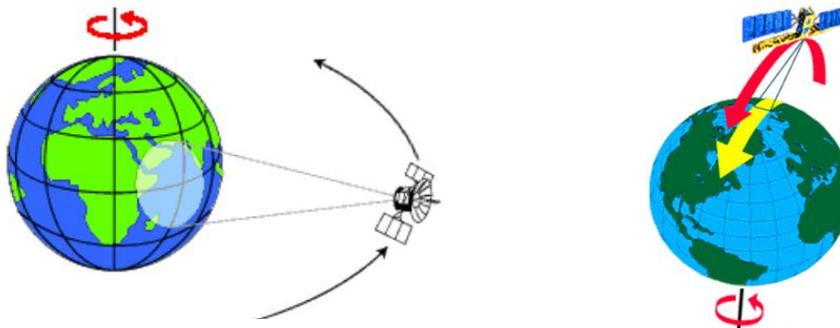


Figura 10. Representación de órbita geoestacionaria (izquierda) y órbita heliosíncrona polar (derecha) [6]

2.3. Sistema satelital de navegación global

El sistema satelital de navegación global (GNSS) es un sistema mundial para determinar la posición y el tiempo que incluye uno o más constelaciones de satélites, receptores y un sistema de supervisión de la integridad del sistema, la cual puede ser aumentada si es necesario para apoyar el rendimiento de navegación requerida para la operación prevista [39].

El sistema satelital de navegación global, está constituido por el sistema de posicionamiento global (GPS) operado por los Estados Unidos, el sistema orbital mundial de navegación por satélite (GLONASS) desarrollado por Rusia, el sistema de navegación GALILEO diseñado por la unión europea, el sistema de navegación satelital Beidou/Compass (BDS) de tecnología China, el sistema satelital Quasi-Zenith (QZSS) de origen Japonés y el sistema satelital indio de navegación regional (IRNSS) del país de la india [39].

El GPS, es un servicio propiedad de los Estados Unidos, que proporciona a los usuarios información sobre posicionamiento, navegación y cronometría. Este sistema está constituido por tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento del usuario. Esto se ilustra en la Figura 11.

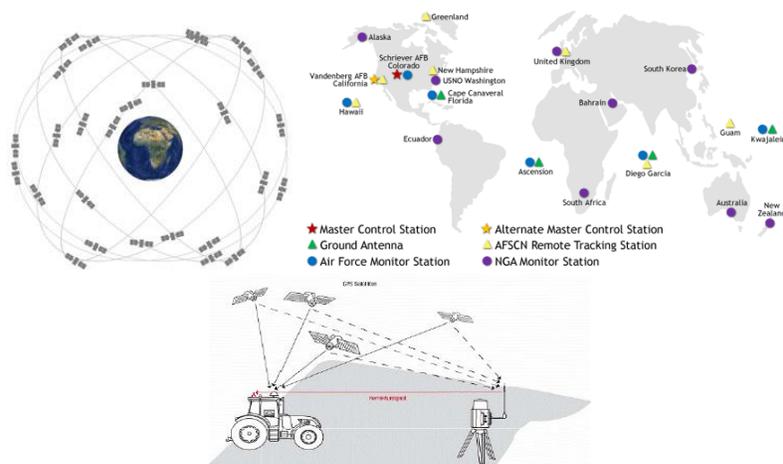


Figura 11. Segmentos que constituyen al sistema GPS, Segmento espacial (superior izquierda), segmento de control (superior derecha) y segmento de usuario (inferior centro) [40]

El segmento espacial, está constituido por una constelación de 24 satélites, con ello garantizar que en cualquier lugar del mundo los receptores puedan, al menos, tener 4 satélites visibles, número mínimo necesario para poder determinar la deriva que existe entre el reloj del satélite y el reloj del usuario, así como la posición en base a la latitud, longitud y altura de un punto sobre la superficie terrestre. Los satélites transmiten dos señales portadoras de doble frecuencia en la banda L de las ondas electromagnéticas en L1 a 1575.42 MHz y L2 a 1227.60 MHz. Estas frecuencias están constituidas por Código C/A, utilizado en la navegación de baja precisión, modulado en la frecuencia L1 y es de uso civil. El Código P empleado en la navegación de alta precisión, modulado en ambas frecuencias. Código de navegación modulado en la frecuencia L1 y provee descripción de las órbitas de los satélites, las correcciones de los relojes y otros parámetros del sistema.

El segmento de control, tiene la función de realizar el seguimiento continuo de los satélites, calcular su posición precisa, transmisión de datos y la supervisión de todos los satélites del sistema. Está constituida por estaciones de monitoreo, las cuales tienen la función de rastrear los satélites y de determinar las efemérides que el satélite transmite, así como la corrección de tiempo o de oscilador de los satélites, además de enviar estos datos a la estación de control maestra. La estación de control maestra localizada en Colorado Springs, Colorado (EUA), recolecta los datos obtenidos por las estaciones de monitoreo. Aquí se calculan las efemérides de cada uno de los satélites. Esta información es distribuida a una de las tres estaciones de control terrestres, que son las encargadas de grabar estos parámetros en los satélites, es decir las estaciones de control terrestres son el conducto de comunicación con los satélites con la función de enviar las órbitas y parámetros calculados en las estaciones de seguimiento a los satélites.

El segmento de usuario, está constituido por los instrumentos utilizados para la recepción y procesamiento de la señal emitida por los satélites. Estos instrumentos están integrados esencialmente por una antena y un receptor. Un equipo complementario es usado, en ocasiones, para transferir datos entre receptores.

La determinación de la posición de un punto mediante GPS se basa en la medida de la distancia entre el receptor y el satélite, basado en la comparación entre la información del código o fase de la portadora en la señal recibida por el receptor procedente del satélite y la réplica de dicha señal generada por el receptor. Además la antena del receptor GPS requiere cuando menos la observación simultánea de cuatro satélites para establecer su localización. Para el posicionamiento mediante GPS, debe considerarse la presencia de diversas fuentes de error, tales como los efectos atmosféricos en sus componentes de la Ionosfera y Troposfera, errores de sincronización entre el receptor y satélite, errores de la órbita del satélite, multitrayectoria, interferencia y pérdida de señal, política anti-engaño y errores humanos [41].

Entre los métodos de posicionamiento mediante satélite, se encuentra el posicionamiento puntual absoluto, el posicionamiento relativo o diferencial y el posicionamiento puntual preciso.

El posicionamiento puntual absoluto, consiste en estimar la posición del receptor a partir de las observaciones y efemérides de los satélites. Las coordenadas estimadas del receptor están en el marco de referencia en el que se conocen las posiciones de los satélites. El posicionamiento absoluto en tiempo real, es decir cinemático, se estima una posición en cada época de observación. Mientras posicionamiento absoluto en post-proceso, se estima la posición utilizando todas las observaciones del período de observación.

El posicionamiento relativo o diferencial, consiste en estimar la posición de puntos respecto a un punto o puntos de coordenadas conocidas llamado punto de referencia. Dentro de este tipo de posicionamiento se encuentra el método de diferencias simples, en el cual usando información de dos receptores GPS observando al mismo satélite simultáneamente elimina o reduce significativamente errores comunes incluyendo errores en la órbita y reloj del satélite así como efectos atmosféricos. Por su parte el método de diferencias dobles

utiliza la información de dos receptores GPS observando a los mismos dos satélites simultáneamente eliminando además así errores del reloj del receptor y desplazamiento entre canales, además este método permite calcular una diferencia entre dos posiciones con una exactitud a nivel de milímetros y centímetros. Estos métodos de posicionamiento diferencial son ilustrados en la Figura 12.

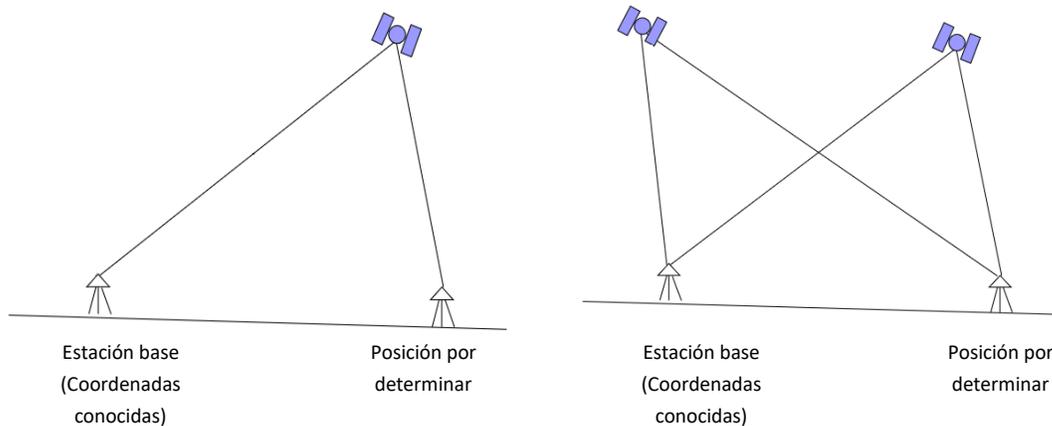


Figura 12. Principio de diferencias simples (izquierda), principio de diferencias dobles (derecha) [41]

El posicionamiento puntual preciso, realiza la determinación de la posición mediante el procesamiento de las mediciones de código de doble frecuencia y de fase de portadora no-diferenciadas de un receptor de doble frecuencia junto con más datos de corrección de los errores en los relojes de los satélites y órbitas precisas. Un método que proporciona soluciones de posición precisa a nivel del decímetro en posicionamiento cinético y en el nivel del centímetro para el posicionamiento estático.

Los sistemas de medición satelital, es aplicada a una variedad de fenómenos geofísicos, que incluyen el movimiento de las placas tectónicas, las deformaciones en los borde de placas, movimientos asociados con los sismos, cambios en la orientación de la Tierra, monitoreo de volcanes, mediciones sobre la atmosfera y ionosfera [42].

En lo que respecta al estudio de fenómenos deformantes en la corteza, la tecnología de posicionamiento satelital, permite cuantificar las velocidades y sentido de los desplazamiento de la corteza terrestre, ya sea por el movimiento continuo generado por la dinámica de la tectónica de placas, que pueden situarse en menos de unos pocos milímetros al año hasta movimientos del orden de los centímetros provocados fenómenos sísmicos de gran potencia [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32].

2.4. Dinamismo de la corteza terrestre

La tierra es un cuerpo vivo, en constante evolución, perceptibles e imperceptibles por las magnitudes de tiempo en el que se desarrollan en contraparte de nuestro reloj de tiempo. Estos cambios moldean la superficie terrestre y los fenómenos que ocurren en ella, dentro de estas dinámicas están las tectónicas de placas y sus diversas manifestaciones provocadas por los esfuerzos en sus desplazamientos, como fallas, fracturas, cuencas, montañas erupciones volcánicas y sismos.

2.4.1 Teoría tectónica de placas

El modelo que explica las fuerzas que moldean la Tierra, esta sostenido en la teoría tectónicas de placas, expuesta por J. Tuzo Wilson, quien en 1965, logro unificar la diversidad de investigaciones, ideas y conceptos existentes, y establecer una teoría que explicara la dinámica de la corteza terrestre.

En 1915 es planteada por Alfred Lothar Wegener en la hipótesis de la deriva continental, donde sugiere la existencia en el pasado de un único continente o supercontinente denominado Pangea y un superocéano que lo rodeaba denominado Panthalassa. A su vez planteo hace unos 200 millones de años, este supercontinente empezó a fragmentarse en continentes más pequeños, que derivaron a sus posiciones actuales.

Las evidencias que sustentaban esta hipótesis eran el ajuste de los continentes, ya que estos mostraban notables semejanzas en las líneas costeras, principalmente a ambos lados del

Atlántico Sur. La evidencia de una distribución de fósiles de las mismas especies entre estos continentes. Las litologías y estructuras semejantes, ejemplos son los cinturones montañosos que terminan en la costa, para reaparecer al otro lado del océano y la continuidad de provincias con conjuntos rocosos similares. Y por último, las evidencias paleoclimáticas, a partir de depósitos glaciales antiguos que cubrían extensas áreas en el hemisferio sur [43].

La hipótesis no tuvo gran aceptación, ya que no presentaba un mecanismo convincente que generara el desplazamiento de los continentes a través del planeta. Aportaciones a favor de esta hipótesis surgieron como la de Edward Suess, que basándose en la distribución de fósiles de floras y de sedimentos de origen glacial, propuso la existencia de un supercontinente que incluía: India, África, Madagascar, Australia y Sudamérica. A este supercontinente le denominó Gondwana. Por su parte Alexander Du Toit propuso la existencia de dos supercontinentes, Laurasia y Gondwana, separados por un océano de nombre Tethys, así como una reconstrucción de Gondwana basada en el arreglo geométrico de las masas continentales y en correlación geológica.

Avances en sismología, como los trabajos de Kiyoo Wadati, quien documentó el incremento en la profundidad de los sismos en función de la distancia tierra adentro hacia el continente y Hugo Benioff lo referente al hecho que las zonas de alta sismicidad no estaban distribuidas de manera aleatoria, sino se albergaban en franjas continuas asociadas a algunos márgenes continentales.

En 1929 Arthur Holmes propone la existencia de corrientes de convección en el manto de la Tierra. Es decir, que las rocas del interior de la Tierra, se calentaban por acción de la radioactividad causando su ascenso y expansión en tanto que cuando se enfriaban volviéndose densas, se hundían nuevamente hacia el interior terrestre. En el mismo siglo en las década de los 50's, K. Runcorn, K. M. Creer, y E. Irving descubrieron que, durante los últimos 500 Millones de años la posición del polo magnético había migrado de manera

gradual desde una posición próxima a Hawái, hacia el norte a través de Siberia, hasta llegar a su posición actual, en lo que llamo deriva polar.

En 1962 surge la hipótesis de la expansión del fondo oceánico, propuesta por Harry Hess, esta señala que las dorsales oceánicas están localizadas sobre zonas de ascenso convectivo en el manto. A medida que el material que asciende desde el manto se expande lateralmente, el suelo oceánico es transportado alejándose de la cresta de la dorsal. En estos puntos, las fuerzas tensionales fracturan la corteza y proporcionan vías de intrusión magmática para generar nuevos fragmentos de corteza oceánica. Por tanto, a medida que el suelo oceánico se aleja de la cresta de la dorsal, es sustituido por nueva corteza. Además propone a las fosas como zonas en donde es consumida la corteza oceánica. Esta idea fue validada con trabajos de inversión magnética y la polaridad detectada en los dorsales oceánicos.

Toda esta diversidad de conceptos e ideas permitieron el establecimiento de la teoría tectónicas de placas, expuesta por J. Tuzo Wilson, explicando el movimiento observado en la litosfera terrestre, por medio de los mecanismos de subducción y expansión del fondo oceánico. Mecanismos que a su vez, generan los principales rasgos geológicos de la Tierra, entre ellos los continentes y las cuencas oceánicas. Fenómenos naturales como la actividad sísmica, volcánica y la distribución de numerosos recursos terrestres.

2.4.2 Dinámica tectónica de placas

La capa que incluye la corteza y el manto superior denominada litosfera, se encuentra fragmentada, estos fragmentos son denominados placas. Las placas de la litosfera son más delgadas en los océanos, donde su grosor puede variar entre unos pocos kilómetros en las dorsales oceánicas y 100 kilómetros en las cuencas oceánicas profundas. Por el contrario, la litosfera continental, poseen un grosor de entre 100 y 150 kilómetros, pero puede superar los 250 kilómetros debajo de las porciones más antiguas de las masas continentales

[43]. La litosfera se encuentra por encima de una región más dúctil del manto, conocida como la astenosfera. El régimen de temperatura y presión de la astenosfera superior es tal que las rocas que allí se encuentran se aproximan mucho a sus temperaturas de fusión, lo que provoca una zona muy dúctil que permite la separación efectiva de la litosfera de las capas inferiores. Así, la roca poco resistente que se encuentra dentro de la astenosfera superior permite el movimiento de la capa externa rígida de la Tierra. Las placas se mueven unas con respecto a las otras y cambiando de tamaño y forma. Se consideran siete placas principales, la placa Norteamericana, la Sudamericana, la Pacífica, la Africana, la Euroasiática, la Indoaustraliana y la Antártica. Otras placas de menor tamaño son la Caribeña, la de Nazca, la Filipina, la Arábiga, la de Cocos, la de Scotia y la de Juan de Fuca. La Figura 13, nos muestra la distribución de estas placas tectónicas y sus desplazamientos predominantes.

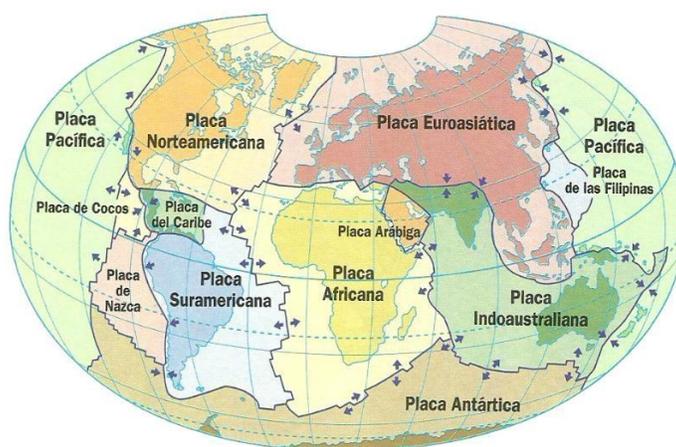


Figura 13. Sistema de placas y sus sentidos de desplazamientos predominantes [44].

Las placas se mueven como unidades coherentes en relación con las otras placas. Aunque el interior de las placas puede experimentar alguna deformación, las principales interacciones se producen a lo largo de sus bordes, estos por su tipo de interacción se definen como divergentes, convergentes y transformantes.

En los bordes divergentes o bordes constructivos, el movimiento de las placas es de separación, lo que produce el ascenso de material desde el manto para crear nuevo suelo

oceánico. En los bordes convergentes o bordes destructivos, las dos placas se juntan provocando el descenso de la litosfera oceánica debajo de una placa superpuesta, que es finalmente reabsorbida en el manto, o posiblemente la colisión de dos bloques continentales para crear un sistema montañoso. Y los bordes de falla transformante o bordes pasivos, donde dos placas se desplazan lateralmente una respecto de la otra sin la producción ni la destrucción de litosfera. Los bordes de placa no son fijos, sino que se mueven y pueden crearse nuevos bordes de placa en respuesta a cambios en las fuerzas que actúan sobre estos.

2.4.3 Teoría del rebote elástico

La teoría del rebote elástico fue enunciada por Harry Fielding Reid en 1911, a raíz de las investigaciones realizadas sobre los efectos ocasionados por el terremoto de San Francisco en 1906 que fue el resultado de un deslizamiento a lo largo de la falla de San Andrés en una longitud mayor a los 300 Km. Produciendo un desplazamiento horizontal que alcanzó los 6 metros [43]. Esta teoría relaciona los sismos con la presencia de fallas que dividen la corteza terrestre, estableciendo que existen ciertas zonas preferenciales de la corteza terrestre, donde se van acumulando lentamente grandes esfuerzos que son soportados por las rocas que la constituyen. Estos esfuerzos ocasionan en las rocas deformaciones elásticas cada vez mayores hasta que se supera la resistencia de las mismas, y se produce entonces una liberación casi instantánea de la energía acumulada a través del tiempo. El resultado de este mecanismo es la propagación de la energía liberada, en forma de las ondas sísmicas y el retorno a un estado de equilibrio elástico de la zona previamente sometida a esfuerzos, con la presencia de una fractura o falla geológica, muchas veces visible en la superficie de la tierra.

2.4.4 Teoría de los sismos

Los sismos en la Tierra son causados por el paso de las ondas sísmicas a través de las rocas, estas ondas se producen por energía almacenada en la corteza terrestre que es liberada repentinamente. Por lo general esto ocurre cuando las masas de roca hacen fuerza una contra la otra, ocasionando una fractura. Esta energía puede ser liberada por deformaciones elásticas, por la gravedad, reacciones químicas o incluso por el movimiento de grandes cuerpos. Entre estas fuentes de energía, la deformación elástica, es considerada como la responsable de generar las mayores vibraciones presentes en la Tierra. Los sismos ocurren con mayor frecuencia a lo largo de las fallas geológicas, que son zonas estrechas donde las masas de roca se mueven una en relación a la otra. Las principales líneas de fractura del mundo se encuentran en las fronteras de las grandes placas tectónicas que componen la corteza terrestre [45].

Se considera que los terremotos se desarrollan en 4 etapas [45], durante cada una de ellas ocurren una serie de cambios en la Tierra. Estas etapas derivan de la teoría del rebote elástico y son las siguientes:

Etapa I: Al estar los dos lados de una falla en movimiento la deformación elástica se acumula lentamente en las rocas y las partículas rocosas se juntan y se comprimen.

Etapa II: Las rocas están lo más comprimidas posibles y la única manera en que pueden cambiar de forma es que se expandan y ocupen un mayor volumen, a esto se le llama dilatación. El aumento de volumen es causado por las microfisuras, que al formarse hacen que el agua que, normalmente llena los poros y las fisuras en las rocas, sea forzada a salir y el lugar ocupado por esta, ahora es llenado por aire.

Etapa III: Durante esta etapa el agua es forzada a salir de los poros y fisuras por la presión ejercida por el borde de las rocas. Entonces, el agua retrocede y las rocas dilatadas pierden su fuerza. Las rocas experimentan más tensión de lo normal y el ritmo con que las rocas pierden su resistencia determina el instante de la falla. El flujo del agua impide que se

generen más microfracturas con lo que se detiene la expansión de las rocas. El flujo del agua además proporciona lubricación para la liberación del aumento de presión.

Etapa IV: finalmente, las rocas ya no resisten la tensión y la falla se rompe, produciendo la liberación de energía elástica, almacenada en las rocas, en forma de calor y ondas sísmicas que conforman un sismo.

2.4.5 Lineamientos

El término de lineamientos, fue definido originalmente por Hobbs en 1904, como importantes líneas significantes del paisaje que muestran la arquitectura oculta de la roca basal [46]. Redescubiertos luego por las fotografías aéreas y potenciadas por el procesamiento de imágenes satelitales, son manifestaciones que pueden presentarse como resultado de características como la vegetación, hidrología, morfología, mineralización, hasta fenómenos que ocurren bajo la superficie.

La cartografía de lineamientos se considera de relevante importancia en diferentes disciplinas para resolver determinados problemas en una zona, como en la selección del sitio para la construcción de presas, puentes, carreteras, estudio de aguas subterráneas, en la exploración de yacimientos de minerales, petróleo y gas, entre otros. Dentro de los lineamientos generados por efectos morfológicos se encuentran los canales o divisiones de drenajes, o por efectos humanos o aleaciones de naturaleza antropomórfica, como caminos, acueductos, cultivos, carreteras.

Se asume que los lineamientos son capaces de detectar, al menos en parte, la presencia de roturas en las profundidades de la corteza terrestre. Estos rasgos físicos son observables en imágenes satelitales como discontinuidades naturales estructurales de la superficie del terreno, estructuras geológicas como fallas y fracturas, las que pueden tener diversas dimensiones abarcando desde fracturas milimétricas hasta secciones kilométricas.

El procedimiento para la búsqueda de lineamientos busca destacar discontinuidades estructurales de rocas y otros aspectos relacionados con la actividad tectónica y la morfología propia del área de estudio. Los lineamientos aparecen en las imágenes satelitales como líneas rectas o bordes que se distinguen por las diferencias de tonalidad en las superficies del material, como sutiles diferencias de contraste colineales que, bajo ciertos criterios, se pueden caracterizar como un borde o una línea, de una cantidad discreta de píxeles de largo. Los rasgos lineales remotamente obtenidos son en gran parte un reflejo de fracturas en las rocas, enfatizadas por la vegetación y topografía.

Al considerar los lineamientos como un indicador de fenómenos geológico internos, y dado que los sismos están presentes en zonas de falla o los límites de las placas tectónicas, existen algunas teorías que pretenden entender y eventualmente predecir no solo estos fenómenos, sino que también mostrar la evolución de la corteza terrestre y sus características superficiales.

Estudios [2] [3] [13] proponen un modelo predictivo basado en la dinámica de acumulación y disminución de esfuerzos reflejados en la concentración de lineamientos. Es decir antes de un sismo, el número de lineamientos sobre la zona debe ir en aumento e inmediatamente después del evento sísmico una disminución gradual en su número. Estos lineamientos son resultado de una serie de tratamientos digitales sobre las escenas satelitales del área de análisis. Dicha dinámica se explica por la expansión que sufren la roca durante el proceso de gestación de un sismo, como se comentó en el capítulo anterior de teoría de los sismos, el cual produce una variación en la respuesta del sensor al captar las radiaciones electromagnéticas de la zona, dando como resultado el incremento en el número de lineamientos que surgen de la asociación de las discontinuidades estructurales visibles desde los sensores satelitales, que a su vez al presentar un estado de relajación, la respuesta a dicha radiación se ve también reducida y por lo tanto el número de lineamientos registrables. También se considera el supuesto de que durante las últimas etapas de la

formación de un sismo, desde las fracturas se emiten ondas electromagnéticas con frecuencias capaces de penetrar en la ionosfera y la magnetosfera, las cuales podrían ser registradas en imágenes infrarrojas, y generar variaciones en la captura de los sensores satelitales [12]. Un ejemplo de los resultados obtenidos mediante esta propuesta, se puede apreciar en la Figura 14, que hace referencia al caso de estudio del sismo del 13 de junio de 2005 en la región de Arica, Chile [2].

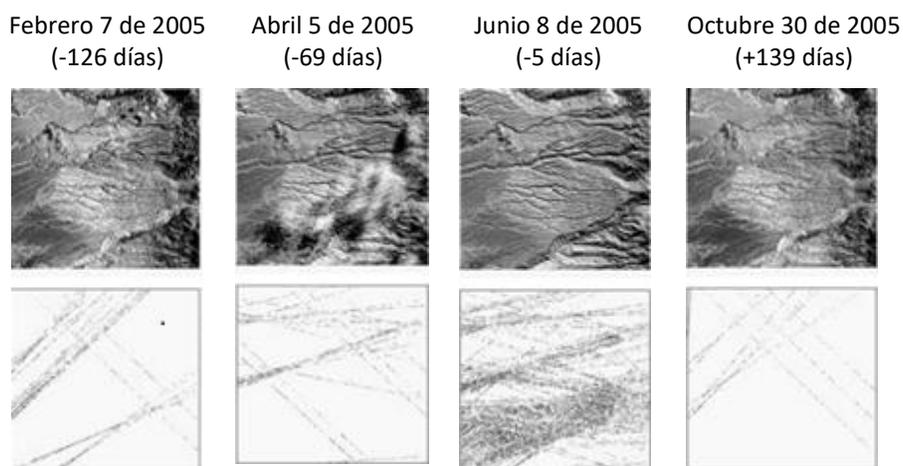


Figura 14. Dinámica de lineamientos extraídos del sismo del 13 de junio de 2005 Arica en Chile [2]

2.5. Calor interior

Los procesos geodinámicos que suceden en la Tierra son controlados por la transferencia y generación de calor en su interior. El calor es el motor de la tectónica de placas, derivado de diversos mecanismos presentes en las estructuras internas de la Tierra, que comprende las capas superiores como litosfera y la astenosfera, hasta procesos a mayor profundidad, como los movimientos de convección en el manto y el núcleo externo [47], los cuales son detallados en la Tabla 4. Esta energía calorífica que la tierra transmite desde sus capas internas hacia la parte más externa de la corteza terrestre, se denomina energía geotérmica.

Esta fuente de calor es alimentada por de la desintegración de isótopos radiactivos, por la dinámica de los movimientos diferenciales entre las distintas capas que constituyen la Tierra, el calor inicial que es la energía liberada durante la formación de la Tierra, así como del calor latente de la cristalización del núcleo externo [47].

Tabla 4. Origen del calor en el interior de la Tierra y lugar donde se genera [47]

ORIGEN	LUGAR	POTENCIA X 10 ¹² W
Radioactividad	Corteza continental	4.2-5.6
	Corteza oceánica	0.06
	Manto superior	1.3
	Manto inferior	3.8-11.6
	Núcleo	0-1.2
Calor inicial	Manto	7-14
	Núcleo	4-8
Movimientos Diferenciales	Manto	0-7
Calor latente de cristalización	Núcleo Externo	1-2.8
Energía gravitatoria	Núcleo Externo	1

Los principales elementos productores de energía por decaimiento radioactivo son el uranio, torio y potasio. A estos elementos se les encuentra en concentraciones significativas en la corteza continental como rocas graníticas, en la corteza oceánica y la parte inferior de la corteza continental en rocas del tipo basáltico y en el manto superior, formado en su mayor parte por peridotita. Otras fuentes que generan el calor la atracción gravitacional del Sol y la Luna. Ya que además de causar las mareas oceánicas, los esfuerzos generados por la atracción gravitacional deforman la parte sólida de la Tierra y aunque estas deformaciones son del orden de una parte en un millón, ocasionan un desplazamiento de cerca de 30 cm en la superficie terrestre.

El transporte de calor en el interior de la Tierra se lleva a cabo por medio de tres mecanismos: conducción, convección y radiación.

La conducción es la forma como se transporta el calor de un cuerpo más caliente a uno más frío con el cual se encuentra en contacto. La eficiencia de ésta depende de una propiedad de los materiales que se llama conductividad térmica y que nos dice cuál será la diferencia de temperatura provocada por un flujo de calor: a mayor conductividad menor será la diferencia de temperatura a través del material.

La convección es un proceso que se da presenta líquidos y gases. Al ser calentada la parte inferior de un fluido, ésta se expandirá y se volverá menos densa que la parte superior más fría, por lo cual tenderá a subir, con lo que la parte fría quedará ahora en contacto con la fuente de calor repitiéndose de esta forma el proceso y dando origen a lo que se llama celdas de convección, en las cuales existen corrientes ascendentes y descendentes. Este mecanismo se va a generar a partir de un cierto valor de la diferencia de temperatura y depende de la viscosidad y densidad del fluido.

La radiación es el mecanismo por el cual el calor se transmite por radiación electromagnética; esta capacidad de transporte, está presente en todo cuerpo que posea una temperatura por arriba del cero absoluto o cero grados Kelvin, pero la frecuencia de la radiación emitida es proporcional a la temperatura del material.

Los tres mecanismos tienen diferente grado de importancia en las diferentes capas de la Tierra, es decir en la corteza el principal medio de transporte de calor es la conducción mientras que en el manto lo es la convección y radiación [47].

Las características que presenta el transporte de calor en el interior de la Tierra determinan los fenómenos geológicos que observan en la superficie, basados en la teoría de la tectónica de placas el motor generador de todos los acontecimientos geológicos es la convección del material del manto, que se comporta como un fluido de alta viscosidad. Dicha viscosidad se puede definir como la resistencia de un fluido a fluir y su unidad es el poise. En el caso del

material del manto, su viscosidad es muy grande en del orden de 1020 poises; como comparación, la viscosidad del agua es de 0.01 poises y la del mercurio es 0.02 poises, esto hace que para esfuerzos aplicados en tiempos cortos como ondas sísmicas y esfuerzos por la atracción de la Luna, la Tierra se comporte como un sólido elástico; sin embargo, para esfuerzos con periodos de millones de años, como los provocados por la convección en el manto, éste se va a comportar como un fluido.

La dinámica de estos fluidos se genera entre determinados límites de placas tectónicas: zonas de dispersión y subducción, así como áreas que presentan una delgadez importante en la corteza por el ascenso de material del manto, que sin embargo no llega a constituir una celda de convección, denominados puntos calientes. Estas zonas son los mayores participes en el transporte de calor del interior a la superficie de la Tierra. Y por lo tanto en donde se van a localizar la mayoría de las manifestaciones superficiales del calor interno de la Tierra. Las manifestaciones termales superficiales son la prueba visual del calor encerrado en el interior de la Tierra, y su distribución en la superficie de la Tierra no es uniforme y está relacionada con zonas de actividad tectonovolcánica reciente en términos geológicos. Entre estas manifestaciones se encuentran los manantiales termales, los géiseres sofionis, pozas de lodo, suelos vaporizantes y los volcanes, estos últimos son las manifestaciones de fuente termal con mayor poder, que proporcionan salida a la superficie del magma en forma de lava, ceniza volcánica y gases provenientes del interior de la Tierra.

3. Metodología

3.1. Metodología General

El desarrollo del presente trabajo de investigación establece como área de estudio la Sierra Cucapah, Baja California, México, en un análisis con temporalidad de dos años antes y dos años después del evento sísmico de 7.2 Mw de Abril de 2010. Contemplando para ello, la utilización de imágenes satelitales, las cuales serán procesadas mediante una serie de técnicas de tratamiento de imágenes, con el objetivo de obtener información correspondiente a lineamientos y temperatura superficial. Mientras el análisis de estaciones de medición continua y constelaciones satelitales, proporcionaran datos para evaluar las deformaciones presentes en la zona de estudio.

En el análisis de las deformaciones, los datos de las estaciones de medición continua y de la constelación de satélites, serán procesados mediante el software GAMIT mediante las técnicas de Posicionamiento Diferencial. El estudio de los lineamientos, tendrá como fuente de datos las imágenes de satélites Landsat 5 TM procesados con el software ADALGEO, el cual evalúa a partir de la aplicación de determinados algoritmos de procesamiento de imágenes que acentúan bordes y líneas producto de la dinámica de acumulación de esfuerzos. La temperatura superficial será analizada por una herramienta computacional desarrollada para el cálculo de temperatura superficial mediante el procesamiento de imágenes térmicas de Landsat 5 TM. Los resultados de las evaluaciones de las distintas variables en la serie de tiempo, permitirán efectuar un análisis en busca de patrones y variaciones, con el objetivo de identificar una relación entre estas variables y la dinámica de la zona de estudio.

3.2. Área de estudio

El área de estudio se sitúa en la parte norte de la península de Baja California, México, aproximadamente 20 kilómetros al sur de la ciudad de Mexicali, entre las latitudes de $32^{\circ} 27' N$ hasta $32^{\circ} 15' N$ y las longitudes $115^{\circ} 35'$ y $115^{\circ} 19'$ cubriendo un área aproximada de 218 km^2 , que es ilustrada en la Figura 15, y que nos sitúa sobre la Sierra de Cucapah. Sitio sobre el cual se presentó el 4 de abril de 2010, el suceso sísmico de 7.2 Mw denominado El Mayor-Cucapah, evento que generó deformaciones superficiales importantes que evidenciaron los esfuerzos acumulados y posteriormente liberados por el fenómeno, con rupturas de hasta 200 km.

Como se especifica de manera textual en [48], la península de Baja California forma parte de la placa Pacífico, la cual se desplaza hacia el NW con respecto a la placa Norteamericana. En la parte norte, el deslizamiento de estas dos placas se manifiesta en una zona de cizalla, que revela una microplaca flanqueada por fallas dextrales que rota en el sentido opuesto a las manecillas del reloj, y que ocupa área marina y continental. El norte de Baja California ha sido afectado desde el Plioceno por fallas laterales dextrales con arreglo paralelo orientadas $N30^{\circ}W$, $N40^{\circ}W$ y $N70^{\circ}W$. El movimiento general de estas fallas está gobernado por el sistema San Andrés-Golfo de California en donde se han identificado fallas que pueden generar sismos hasta de magnitud 7 Mw.

Al ser una zona de suelo pobre, de mínima vegetación y actividad humana, esta permite visualizar propiedades del basamento rocoso que reflejan las dinámicas internas de la corteza, con un menor ruido, beneficiando el análisis mediante técnicas de teledetección de fenómenos relacionados con la sismicidad como deformaciones, temperaturas superficiales y gases.

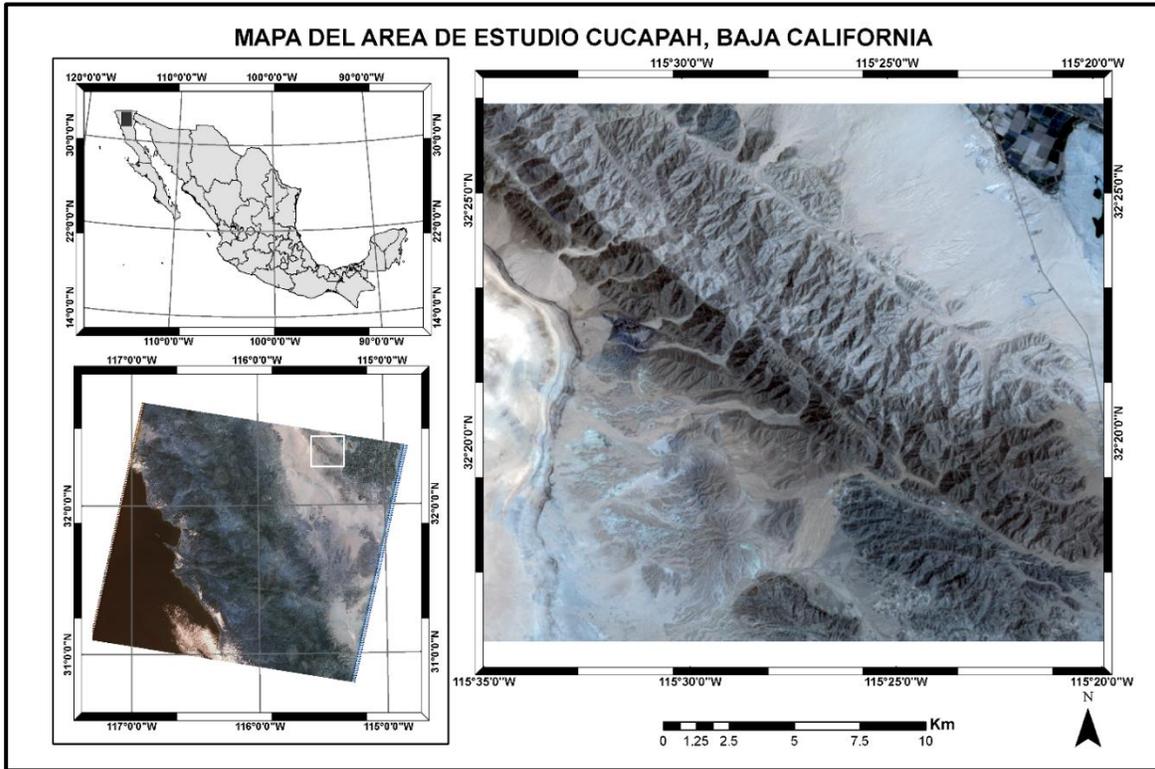


Figura 15. Mapa del área de estudio

En la Tabla 5 se muestran los sismos con una magnitud mayor o igual a 5 Mw registrados entre el periodo de Enero de 2008 a Diciembre de 2011 en un radio aproximada de 25 Km del área de estudio de la sierra de Cucapah, donde se incluye la fecha, coordenadas del epicentro, la profundidad y magnitud. En el mapa de la Figura 16 se muestra la ubicación de los eventos sísmicos descritos en la Tabla 5 con sus respectivos mecanismos focales.

Tabla 5. Sismos de una magnitud ≥ 5 Mw, en un radio aproximado de 25 Km del área de estudio de la sierra de Cucapah para un periodo de Enero de 2008 a Diciembre de 2011.

Fecha	Coordenadas	Profundidad (Km)	Magnitud (Mw)
2010-04-08	32.165°N 115.268°O	10	5.3
2010-04-04	32.266°N 115.293°O	10	5.4
2010-04-04	32.300°N 115.260°O	10	5.4
2010-04-04	32.453°N 115.632°O	10	5.3
2010-04-04	32.286°N 115.295°O	10	7.2
2009-12-30	32.464°N 115.189°O	6	5.8

2009-09-19	32.371°N 115.261°O	10	5.1
2008-02-19	32.432°N 115.313°O	6	5.0
2008-02-11	32.327°N 115.257°O	6	5.1
2008-02-09	32.359°N 115.277°O	6	5.1

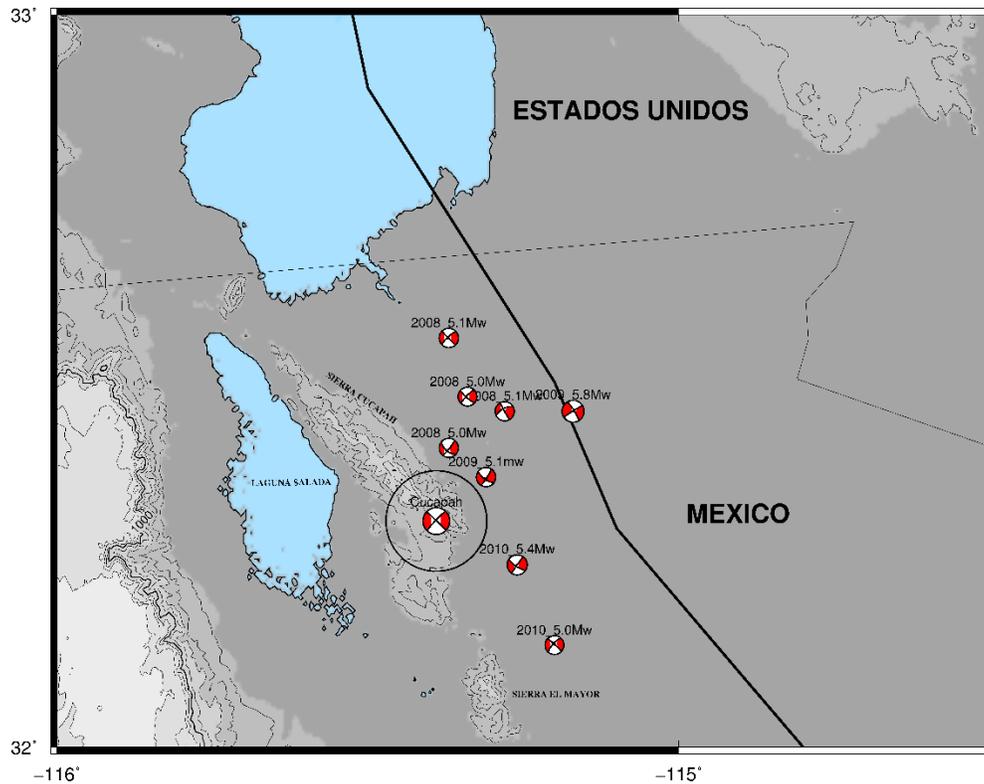


Figura 16. Mapa de la distribución de los eventos sísmicos especificados en la tabla 5

Marco geológico regional

Con fundamento en el estudio realizado por [49], se describe la provincia extensional del golfo que abarca la margen oriental de la península de Baja California y la margen occidental de la parte continental de México, como un área constituida por estructuras generadas durante el periodo geológico del Mioceno a partir de un proceso extensional, el cual posteriormente cambio en transtensional con la definición del límite entre las placas

Pacífico y Norteamérica. Este proceso propicio la generación de un rift oblicuo y una dinámica de zona caracterizada por sistemas de centros de dispersión y fallas transformantes. Los centros de dispersión en el Golfo de California se caracterizan por un magmatismo cuaternario y por actividad geotérmica. A partir del centro de dispersión ubicado más al norte de la serie distribuida a lo largo del golfo, se inicia el complejo sistema de fallas de San Andrés.

El norte del escarpe de Sierra Juárez, representa el bloque superior de una falla de bajo ángulo de tipo detachment, con raíz bajo las Sierras Peninsulares, formando la depresión de la Laguna Salada. El escarpe en esta región tiene más de 1000 metros y contiene una serie de fallas sub-paralelas de orientación NNW sintéticas y antitéticas a la falla de bajo ángulo Cañada David [49].

En el límite oriental, la presencia de la zona de falla tipo detachment con deslizamiento al oeste o al WNW implica que el basamento granítico-metamórfico expuesto en las sierras Cucapah y El Mayor, forman el bloque de piso, levantado por erosión tectónica [5].

En el borde SW de la Sierra Cucapah existen zonas de fallamiento dextral-oblicuo con orientación NW y tendencia paralela al sistema de falla San Andrés, principalmente la Falla Cucapah y la Falla Laguna Salada. La interacción de fallas de desplazamiento lateral y fallas normales ha contribuido al desarrollo de la cuenca de Laguna Salada y al levantamiento de las sierras El Mayor y Cucapah [49].

La geología de La Sierra Cucapah que se expone en la carta geológica de la Figura 17, está caracterizada por un fracturamiento compensatorio importante con rumbo NW-SE asociado con desplazamientos alternativos de ambos. Las fallas regionales presentes en la sierra son las fallas Cucapah, Borrego y Pescadores, de edad post-miocénica, las cuales tienen un desplazamiento dextral normal. Mientras la falla de Laguna Salada contigua al oeste de la sierra, evolucionó de un comportamiento lístrico a dextral normal durante el evento distensivo del Mioceno [49].

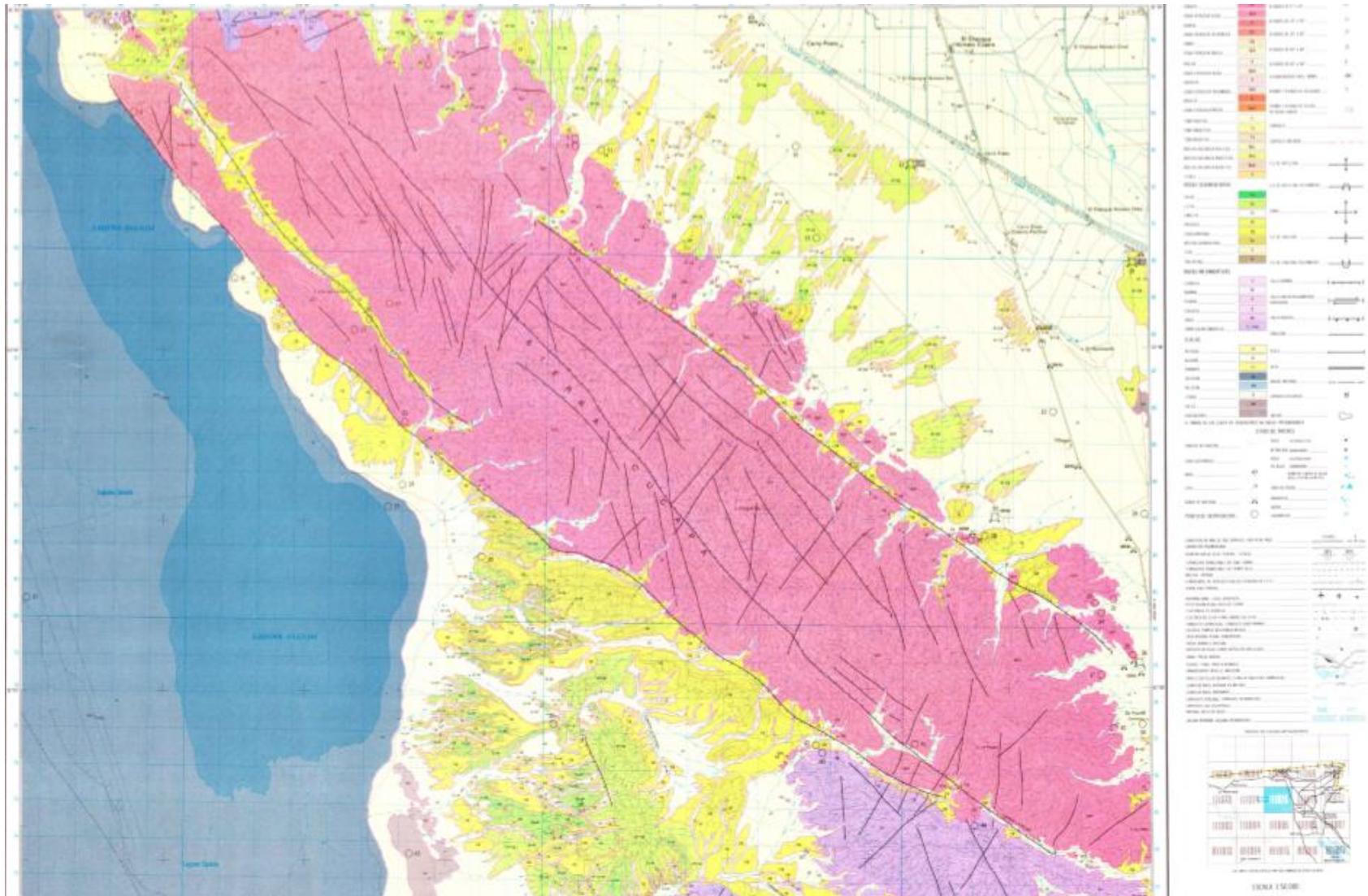


Figura 17. Carta geológica de la Sierra de Cucapah, escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)

Configuración Sismo-tectónica

El sismo de Mayor-Cucapah de Abril 2010 activó el movimiento en, por lo menos, siete diferentes fallas (cercanas y conectadas) con diversas orientaciones, produciendo la ruptura más compleja documentada en el margen de las placas Norteamérica - Pacífico.

Desde el sismo del noroeste de la falla Laguna Salada de Febrero de 1892, ningún otro evento con una magnitud similar había ocurrido tan próximo al epicentro del sismo El Mayor-Cucapah de Abril 2010. Históricamente, otros eventos de magnitud similar ocurrieron en la región. En 1940 la falla Imperial generó un sismo de magnitud 6.9 Mw ligeramente al norte de la frontera internacional. También, en 1915 y 1934 dos eventos cercanos a los 7 Mw ocurrieron en la falla Cerro Prieto, al sureste del epicentro de Abril 2010 [50]. El sismo El Mayor-Cucapah, del 4 de Abril de 2010, provocó en la vecindad del epicentro, un intenso fenómeno de licuefacción y notables agrietamientos superficiales. Las réplicas iniciaron sobre la Sierra El Mayor y migraron hacia el noroeste, a lo largo de la Sierra Cucapah. La zona de réplicas se distribuyó al sureste y al noroeste del evento principal. Al noroeste los epicentros se traslaparon con el sistema de fallas de la Laguna Salada, lo que representa una distancia mayor a los 120 km. La deformación en la corteza causada por la secuencia del sismo refleja la tectónica de la región, que se caracteriza por interacciones complejas de fallas de deslizamiento y fallas normales que conducen a deformación transtensional lateral derecha, incluida la extensión de la cuenca [5].

3.3. Materiales y métodos

La constelación de satélites Landsat, son una serie de satélites desarrollados y operados por las instituciones norteamericanas de Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), que a partir de 1972 están recolectando información de la Tierra desde el espacio, con 8 generaciones desarrolladas a lo largo de su programa, como se muestra de manera cronológica en la Figura 18, han permitido el estudio de continuo de los cambios en la superficie terrestre

desde el espacio. Dentro de esta constelación se encuentra el satélite Landsat 5 con sensor TM, un sensor de barrido multiespectral, que opera simultáneamente en siete bandas espectrales, siendo tres en el visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal. Con una resolución espacial de 30 metros en las bandas de reflexión, 120 metros en la banda termal y una tamaño de escena de 170 km x 185 km.



Figura 18. Grafica cronológica de la constelación de satélites Landsat [51]

La banda térmica, que se encuentra en el rango de 10.4-12.5 μm , resulta apropiada para la obtención de modelos térmicos detallados de la superficie terrestre.

Con base en [52] [53], se especifica la fórmula para el cálculo de la temperatura superficial en:

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (3.1)$$

Donde:

- T = Temperatura en grados Kelvin efectiva en satélite
- K2 = Constante de calibración 2
- K1 = Constante de calibración 1
- L_λ = Radiancia espectral en la apertura del sensor en $\text{watts}/(\text{m}^2 * \text{ster} * \mu\text{m})$

Donde las constantes de calibración K1 y K2, son especificados en la Tabla 6.

Tabla 6. Constantes de calibración de la banda térmica para el Landsat 5 y 7 [48]

	Constante 1 (K1) watts/(m2 * ster * μm)	Constante 2 (K2) watts/(m2 * ster * μm)
Landsat 7	666.09	1282.71
Landsat 5	607.76	1260.56

Requiriendo previamente la transformación de los números digitales de las imágenes que están a 8 bits en un rango de 0 a 255, a unidades de radiación mediante la siguiente formula:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{QCALMAX - QCALMIN} \right) * (QCAL - QCALMIN) + LMIN_{\lambda} \quad (3.2)$$

Donde:

- L_{λ} = Radiancia espectral en la apertura del sensor en watts/(m2 * ster * μm)
- QCAL = Valor del pixel cuantificado en ND (número digital)
- QCALMIN = Valor mínimo de pixel cuantificado en ND (correspondiente a LMIN)
- QCALMAX = Valor máximo de pixel cuantificado en ND (correspondiente a LMAX)
- $LMIN_{\lambda}$ = Radiancia espectral correspondiente al QCALMIN en watts/(m2 * ster * μm)
- $LMAX_{\lambda}$ = Radiancia espectral correspondiente al QCALMAX en watts/(m2 * ster * μm)

La ecuación anterior también puede definirse como:

$$L_{\lambda} = G_{rescale} * QCAL * B_{rescale} \quad (3.3)$$

Donde:

- $G_{rescale} = \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{QCALMAX}$
- $B_{rescale} = LMIN_{\lambda}$

Presentando los valores de radiancia espectral variantes a partir de determinadas fechas, lo cual se describe en la Tabla 7.

Tabla 7. Radiancia espectral, $L_{MIN\lambda}$ y $L_{MAX\lambda}$ watts/(m² * ster * μ m) [47]

Fecha	Del 1 de marzo de 1984 a 4 de mayo de 2003				Del 5 de mayo de 2003 en adelante			
	$L_{MIN\lambda}$	$L_{MAX\lambda}$	$G_{rescale}$	$B_{rescale}$	$L_{MIN\lambda}$	$L_{MAX\lambda}$	$G_{rescale}$	$B_{rescale}$
1	-1.52	152.10	0.602431	-1.52	-1.52	193.0	0.762824	-1.52
2	-2.84	296.81	1.175100	-2.84	-2.84	365.0	1.442510	-2.84
3	-1.17	204.30	0.805765	-1.17	-1.17	264.0	1.039880	-1.17
4	-1.51	206.20	0.814549	-1.51	-1.51	221.0	0.872588	-1.51
5	-0.37	27.19	0.108078	-0.37	-0.37	30.2	0.119882	-0.37
6	1.2378	15.303	0.055158	1.2378	1.2378	15.303	0.055158	1.2378
7	-0.15	14.38	0.056980	-0.15	-0.15	16.5	0.065294	-0.15

El procesamiento de las imágenes para el cálculo de temperatura se realizó mediante Matlab, un software de cálculo matemático, basado en matrices con un lenguaje de programación propio denominado lenguaje M e interfaz de desarrollo integrado. Desarrollado por la empresa MathWorks con sede en los Estados Unidos y orientado principalmente para ingenieros y científicos [54]. Este software contiene características que facilitan el tratamiento de imágenes y el desarrollo de algoritmos para su estudio, como rutinas para la lectura de imágenes multispectrales, el arreglo de pixeles de cada una de estas bandas, operaciones entre pixeles y bandas, implementación de máscaras, y un conjunto de opciones gráficas para mostrar los resultados.

Matlab a la vez, funge como la herramienta de codificación base para el desarrollo de ADALGEO (Sistema automático para la detección y análisis de patrones de lineamiento para propósitos geológicos y geofísicos), un sistema de análisis automático de imágenes satelitales para el estudio de la dinámica de la corteza terrestre, desarrollado en la universidad de Santiago de Chile (USACH), en el cual la extracción automática de lineamientos se compone de una serie de etapas que se realizan secuencialmente para realizar todos los procesos involucrados en la extracción y detección de lineamientos,

normalización previa de imágenes y procesamiento posterior, que puede aplicarse a una imagen individual o una serie completa de imágenes [6].

El tratamiento de las imágenes para la extracción de lineamientos que implementa ADALGEO se fundamenta en la aplicación de algoritmos de detección de bordes y líneas, con los métodos de Canny, la Transformada de Hough, los cuales ya fueron descritos en la sección 2.1.3, 2.1.4 respectivamente, dentro de una serie de etapas que se realizan secuencialmente para el procesamiento. Las etapas principales que constituyen el proceso de extracción son la normalización, extracción de trazos, consolidación de trazos, adelgazamiento de trazos y vinculación de trazos. La implementación, se rige bajo ciertos parámetros de configuración con que establecen los límites y criterios para analizar y procesar las imágenes. Estos parámetros de configuración mostrados en la Tabla 8, son de libre modificación de parte del usuario.

Tabla 8. Principales parámetros de configuración y consideraciones de ADALGEO [18]

Parámetro ajustable	Descripción	Consideraciones
Diámetro de la máscara	Determina el tamaño de la máscara (diámetro) en cantidad de píxeles, típicamente entre 8 y 20.	
Número de direcciones	Determina el número de segmentos angulares que el programa distinguirá y procesará por separado	El diámetro de la máscara debe ser proporción a la cantidad de direcciones
Umbral para convolución	Discrimina los segmentos o trazos con mayor probabilidad de pertenecer a un lineamiento	Tiene una gran influencia en el número final de lineamientos
Proporción mínima de los lineamientos (Largo mínimo)	Discrimina los lineamientos con una cantidad mínima de píxeles válidos del total posible	Tiene una gran influencia en el número final de lineamientos
Maximos de Hough (Hough Peaks)	El número de máximos es la selección de los valores con mayor probabilidad de pertenecer a un lineamiento	Establece el umbral para la selección de trazos válidos en la vinculación con lineamientos y su valor

	por el valor entregado por la transformada	depende en parte del tamaño de la imagen a procesar
Distancia entre trazos (FillGap)	Distancia entre dos trazos consecutivos asociados a un mismo lineamiento, permite fusionar segmentos cercanos en una misma línea continua	Un valor muy alto puede generar falsos lineamientos

Para el análisis de los datos ADALGEO, proporciona herramientas como el diagrama de rosas y mapa de densidad. El diagrama de rosas, es un tipo de histograma de frecuencia circular adecuado para determinar la frecuencia espacial de las orientaciones de un cierto tipo de estructuras, en este caso de los lineamientos. Permite visualizar las direcciones preferenciales y envergadura. Constituido por una serie de círculos concéntricos colocados sobre un conjunto de líneas radiales. El radio de cada círculo es una unidad mayor que el radio del círculo anterior a él, donde los rangos de rumbo se ubican al margen del círculo desde la derecha (Este o 0) hacia la izquierda (Oeste o 180) en sentido contrario a las manecillas del reloj. La cantidad de los datos pertenecientes a cada rango, se cuantifican en cada eje desde el centro (como 0 %) hacia al margen (como 100 %).

El mapa de densidad, por su parte, aporta una descripción visual del rango de concentración de los rasgos lineales detectados en la imagen. Lo que permite observar la evolución de los lineamientos, su densidad en forma sectorizada y la dirección dominante de los trazos en un sector específico de la imagen.

La fuente de imágenes para el análisis de lineamientos, al igual que en estudio de la temperatura superficial, es el satélite Landsat 5 TM y se consideraron por sus respuestas espectrales para el estudio la banda 4 del infrarrojo cercano y la banda 5 del infrarrojo medio. El listado de las escenas consideradas para los estudios de la temperatura superficial y lineamientos se presenta en la Tabla 9, donde se especifica la nomenclatura del archivo, el año y día de la observación.

Tabla 9. Listado de imágenes Landsat 5 TM para análisis de temperatura y lineamientos

Archivo	Año	Día
LT50390382008042EDC00	2008	042
LT50390382008074EDC00	2008	074
LT50390382008122EDC00	2008	122
LT50390382009172EDC00	2009	172
LT50390382009220EDC00	2009	220
LT50390382009252EDC00	2009	252
LT50390382009268EDC00	2009	268
LT50390382009348EDC00	2009	348
LT50390382010031EDC00	2010	031
LT50390382010047EDC00	2010	047
LT50390382010079EDC00	2010	079
LT50390382010127EDC00	2010	127
LT50390382010191EDC00	2010	191
LT50390382011114EDC00	2011	114

Respecto al análisis de las velocidades de desplazamiento de la capas superiores de la corteza terrestre, estaciones de monitoreo continuo brindan información diaria para la generaciones de soluciones, como el caso del consorcio PBO (Plate Boundary Observatory), IGS (International GNSS Service), CORS (Continuously Operating Reference Station) y UNAVCO (University NAVSTAR Consortium). Archivos de efemérides precisas y de navegación son proporcionados para el análisis del punto de control terrestre, los cuales mediante software especializado cuantifican y caracterizan dicha dinámica. GAMIT/GLOBK es un paquete de análisis GPS integral desarrollado en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), el Centro Harvard-Smithsoniano para Astrofísica (CfA), y la Institución Scripps de Oceanografía (SIO) para estimar las coordenadas de la estación y las velocidades, estocástico o representaciones funcionales de la deformación post-sísmica, retrasos atmosféricos, órbitas de los satélites, y parámetros de orientación de la Tierra.

GAMIT/GLOBK, está constituido básicamente por módulos, librería y subprogramas, diseñados a través de los lenguajes de programación FORTRAN y C, compilados bajo el entorno UNIX [55].

El módulo GAMIT, provee la estimación de coordenadas relativas de una serie de estaciones, así como parámetros orbitales de satélites GPS, parámetros de orientación de la Tierra (EOPs), retardos atmosféricos y ambigüedades de fase. Esto mediante la aplicación de un ajuste mínimocuadrático ponderado de dobles diferencias de observables de fase. Los datos de entrada son los observables de código y fase para cada estación, en formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format), junto con valores a priori de órbitas del Servicio GNSS Internacional (IGS), EOPs, navegación, meteorológicos, modelos físicos, entre otros.

Mientras el módulo GLOBK tiene como funciones principales la generación y análisis de series temporales, la combinación espacial y temporal de soluciones, y la imposición de un marco de referencia concreto a dichas soluciones. Basado en los datos de entrada procedente de GAMIT del tipo de estimaciones de parámetros junto con su matriz varianza-covarianza. GLOBK utiliza un filtro Kalman para combinar las soluciones y ajustar el marco de referencia, dando como resultado nuevas estimaciones de coordenadas y velocidades [56].

La Figura 19, permite visualizar el flujo de acción entre los módulos GAMIT- GLOBK para el procesamiento de los datos, describiendo algunos comandos, archivos de entrada y salida, soluciones matemáticas implementadas.

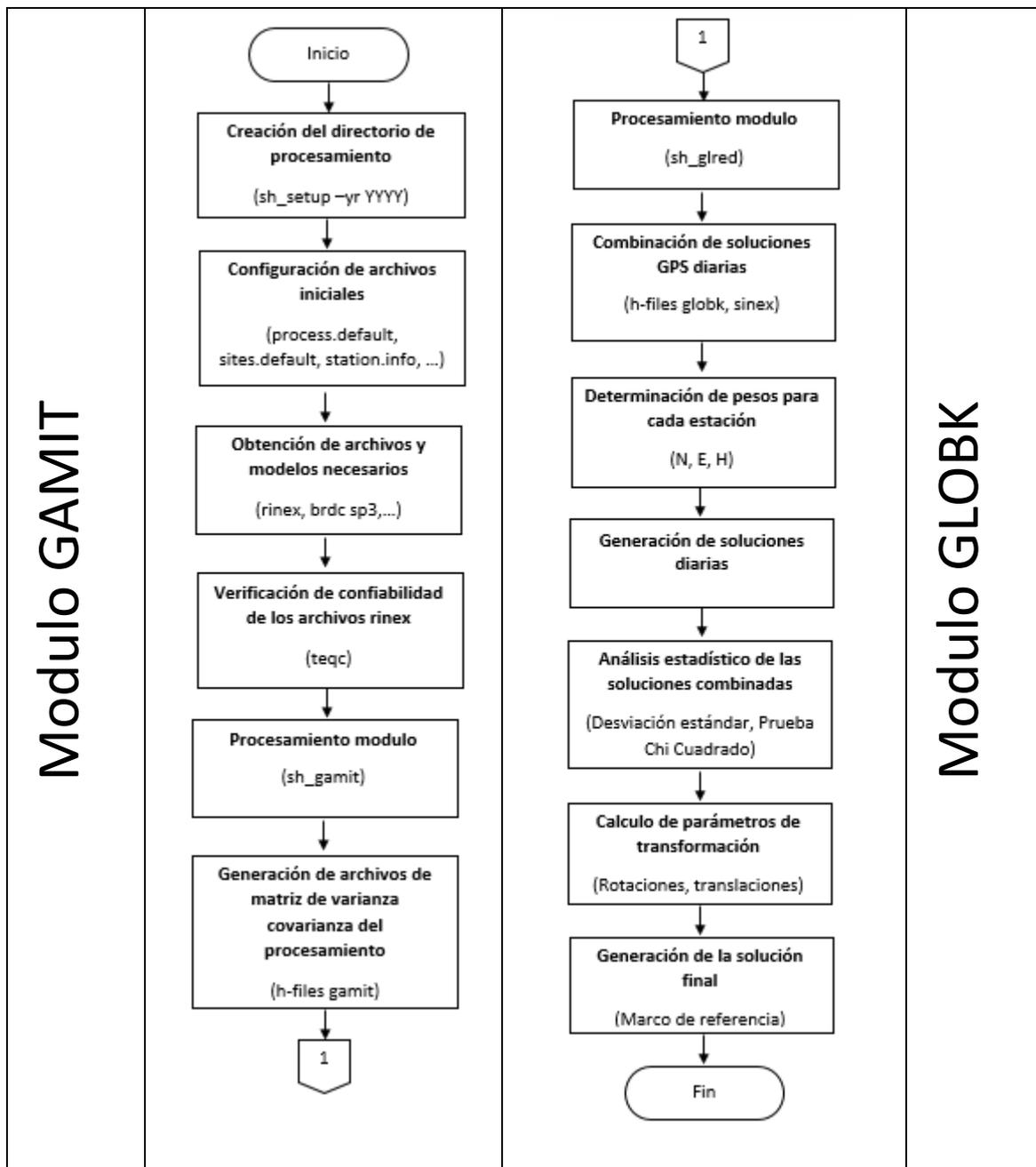


Figura 19. Flujo de procesamiento de datos GAMIT-GLOBK [55]

A continuación en la Tabla 10, se describen las estaciones de medición continua GPS (CGPS), donde se incluye su localización a través de coordenadas geodésicas, el intervalo de medición y el número de días con datos disponibles para el periodo estudiado de 2008 a 2011.

Tabla 10. Estaciones de medición CGPS

Estación	Latitud (grados, minutos, segundos)	Longitud (grados, minutos, segundos)	Intervalo Medición (s)	2008	2009	2010	2011
MEXI	32 37 58.77027	-115 28 32.53303	15	359	362	357	361
P066	32 36 59.48771	-116 10 11.23064	15	365	364	364	354
P494	32 45 34.75947	-115 43 55.43761	15	365	364	364	364
P500	32 41 24.17023	-115 17 59.75487	15	365	363	341	364

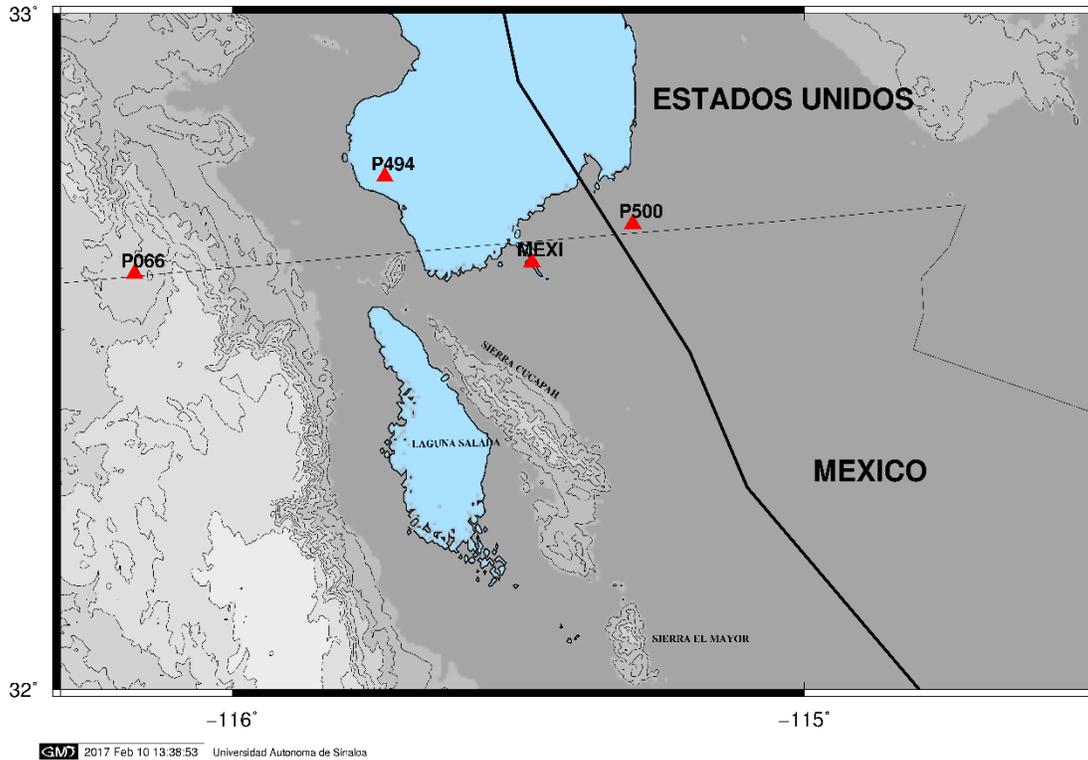


Figura 20. Mapa con las estaciones de medición CGPS de análisis

Por su parte, en la Tabla 11, se describen las estaciones de medición continua GPS implementadas como referencia, donde se incluye su localización a través de coordenadas geodésicas, el intervalo de medición y el número de días con datos disponibles para el periodo estudiado de 2008 a 2011. Asimismo se presenta un mapa con la configuración de las estaciones CGPS de análisis y de referencia en la figura 21.

Tabla 11. Estaciones de referencia CGPS

Estación	Latitud (grados, minutos, segundos)	Longitud (grados, minutos, segundos)	Intervalo Medición (s)
AMC2	38 48 11.24754	-104 31 28.53940	30
DRAO	49 19 21.42740	-119 37 29.93788	30
DUBO	50 15 31.71207	-95 51 58.25262	30
FLIN	54 43 32.10202	-101 58 40.92565	30
GOLD	35 25 30.56152	-116 53 21.30240	30
HOLB	50 38 25.27156	-128 08 05.99325	30
MDO1	30 40 49.83990	-104 00 53.97633	30
NLIB	41 46 17.72749	-91 34 29.62512	30
VNDP	34 33 22.72141	-120 36 59.22289	30
WILL	52 14 12.72327	-122 10 04.12510	30

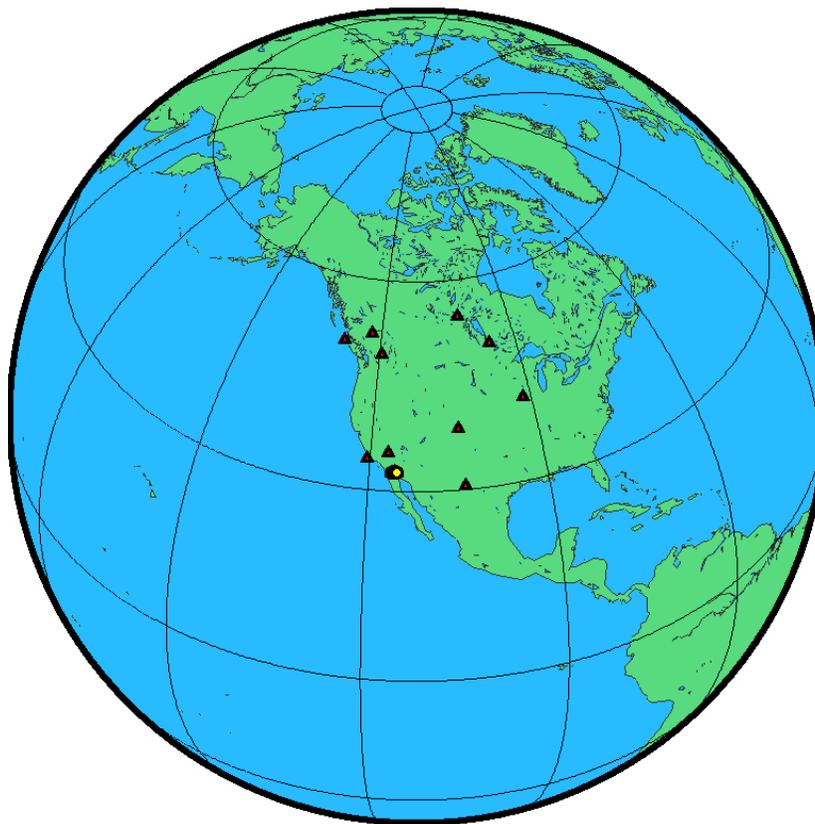


Figura 21. Mapa con la configuración de las estaciones CGPS de análisis y de referencia.

4. Experimentación y Resultados

4.1. Temperatura superficial

Partiendo del estudio [49], en el cual se detalla la activación de manifestaciones termales en relación al sismo del 4 de abril de 2010, de 7.2 Mw en la zona de Cuapah, se buscó identificar mediante el análisis de la banda térmica del satélite Landsat 5 TM, una representación de la temperatura superficial en la zona, con el fin de encontrar algún comportamiento que relacione las mediciones obtenidas y su distribución con la actividad sísmica.

Considerando las imágenes referenciadas en la Tabla 9 y la fórmula de cálculo de temperatura (3.1), ambas expresadas en el capítulo 3.2 de materiales y métodos, se obtuvieron sobre cada imagen analizada un mapa de la temperatura, histograma de la temperatura, gráfica de distribución de la temperatura y los valores de temperatura en relación a la media aritmética (\bar{x}), mediana (\tilde{x}) y desviación estándar (σ). Resultados que son desplegados a continuación en la serie de figuras compuesta entre los índices Figura 22 a Figura 35.

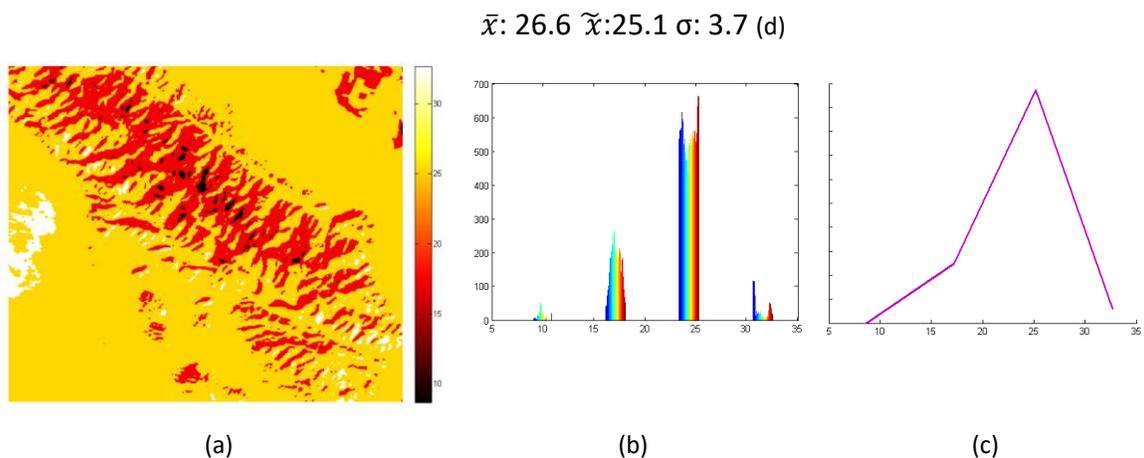


Figura 22. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2008 día: 42. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

\bar{x} : 30.4 \tilde{x} :32.7 σ : 3.9 (d)

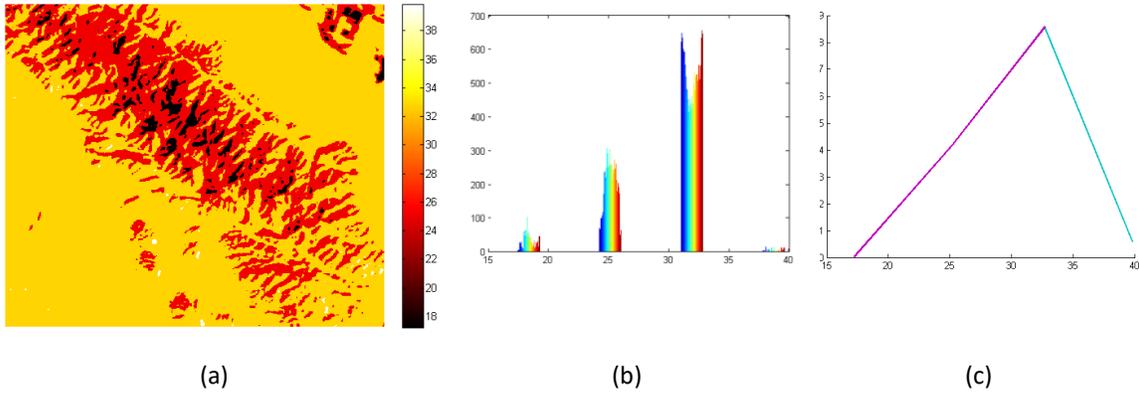


Figura 23. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2008 día: 74. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

\bar{x} : 31.2 \tilde{x} :32.7 σ : 4.0 (d)

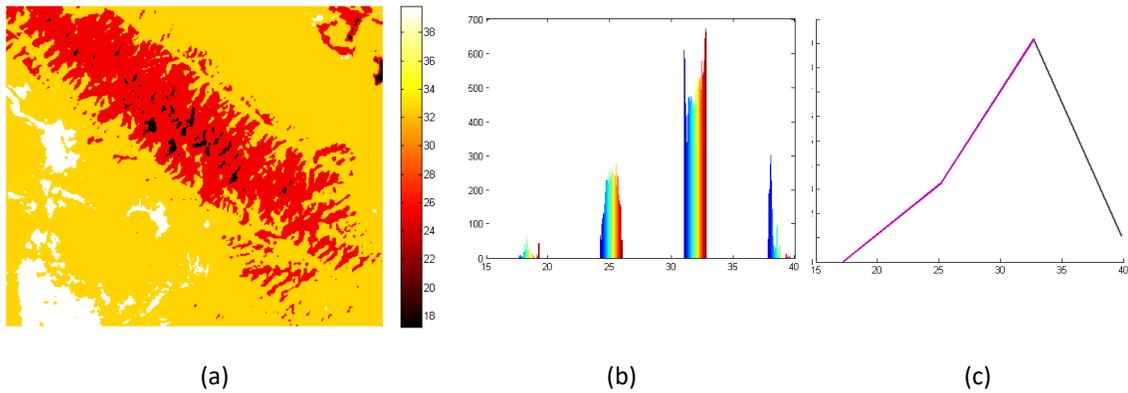
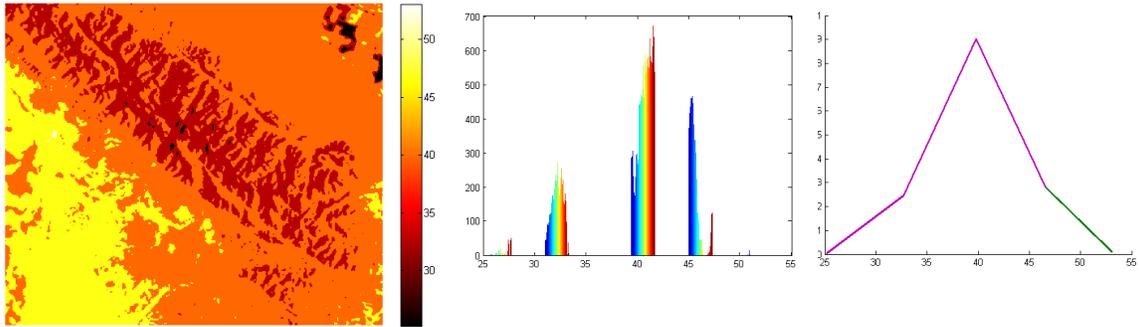


Figura 24. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2008 día: 122. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

$\bar{x}: 39.8 \quad \tilde{x}: 39.8 \quad \sigma: 4.4$ (d)



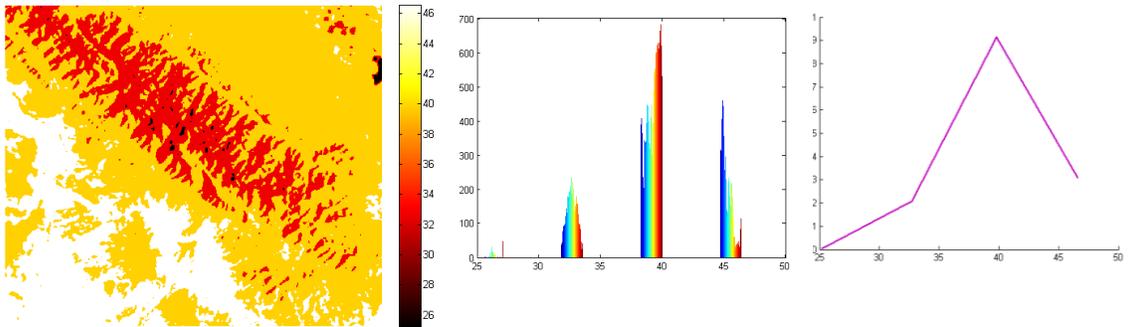
(a)

(b)

(c)

Figura 25. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2009 día: 172. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

$\bar{x}: 40.1 \quad \tilde{x}: 39.8 \quad \sigma: 4.3$ (d)



(a)

(b)

(c)

Figura 26. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2009 día: 220. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

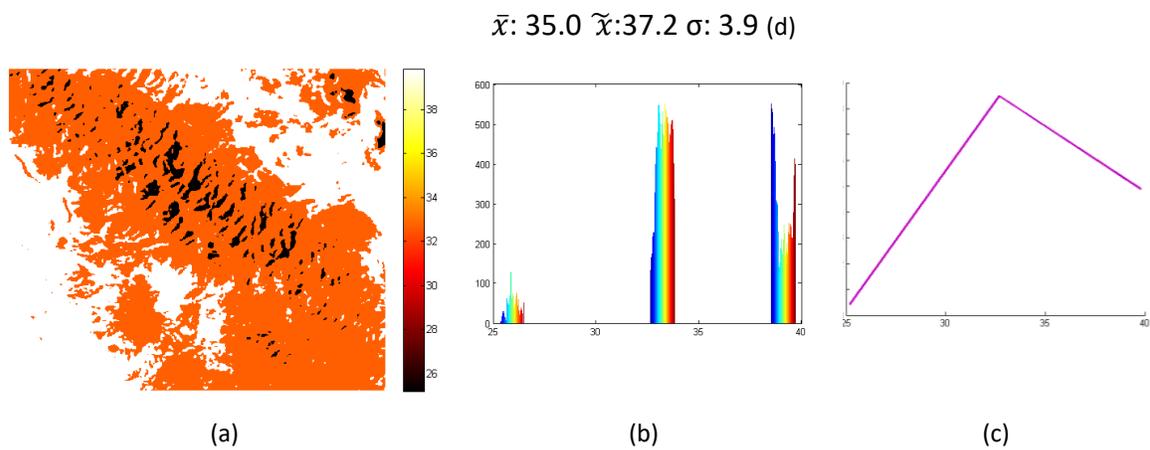


Figura 27. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2009 día: 252. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

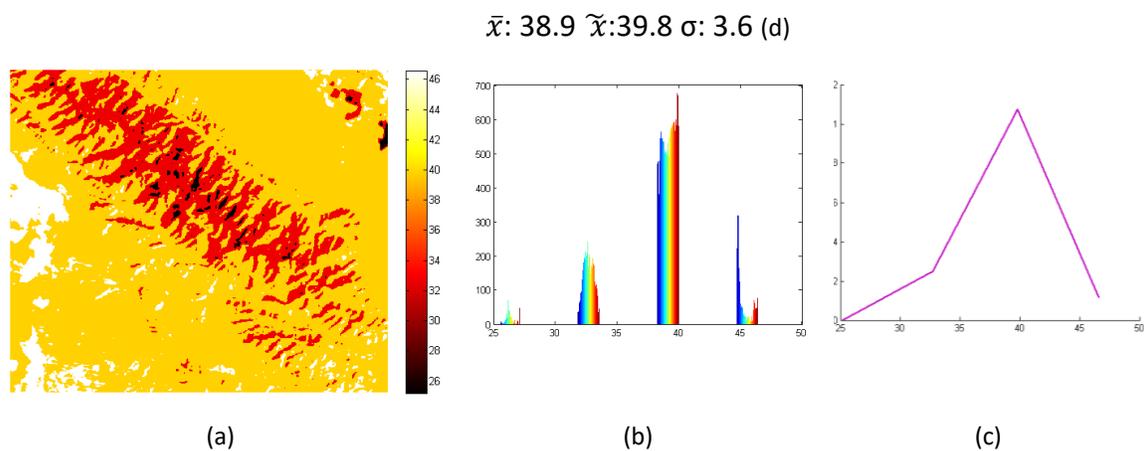


Figura 28. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2009 día: 268. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

\bar{x} : 15.6 \tilde{x} :17.2 σ : 3.4 (d)

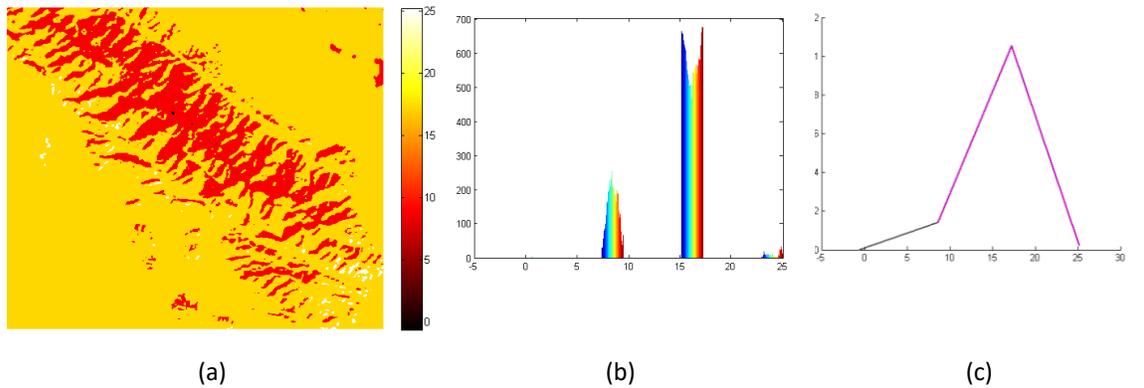


Figura 29. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2009 día: 348. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

\bar{x} : 15.9 \tilde{x} :17.2 σ : 3.2 (d)

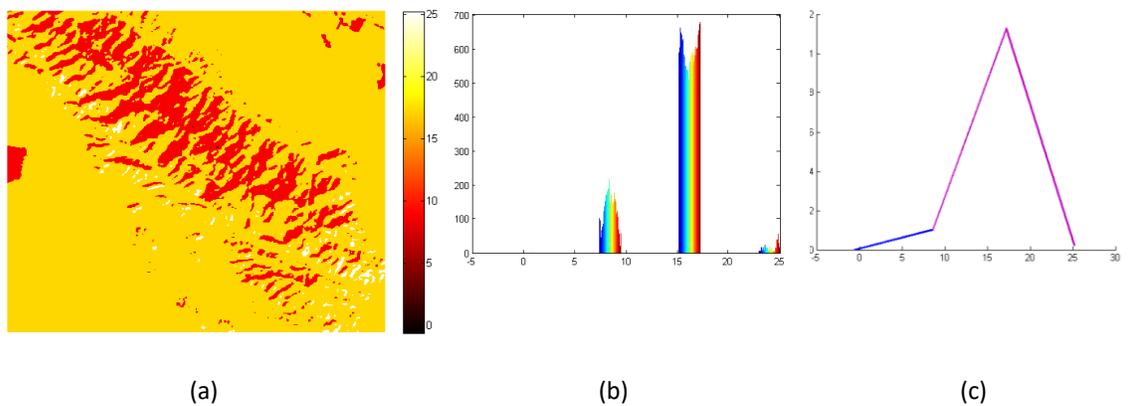


Figura 30. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2010 día: 031. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

\bar{x} : 22.1 \tilde{x} :25.1 σ : 4.2 (d)

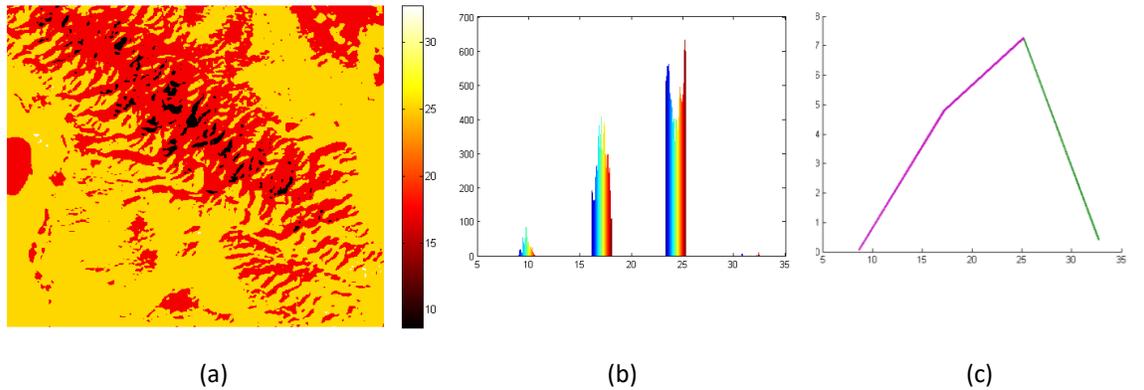


Figura 31. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2010 día: 047. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

\bar{x} : 28.8 \tilde{x} :32.7 σ : 4.8 (d)

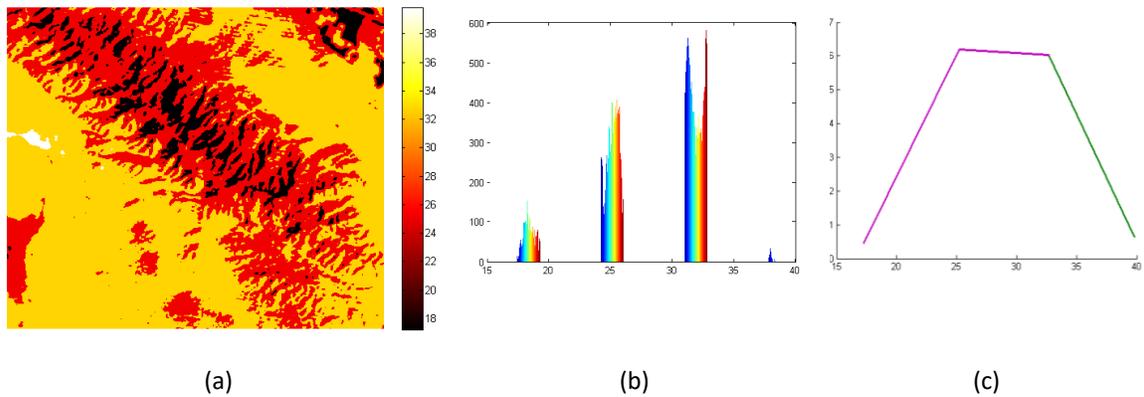
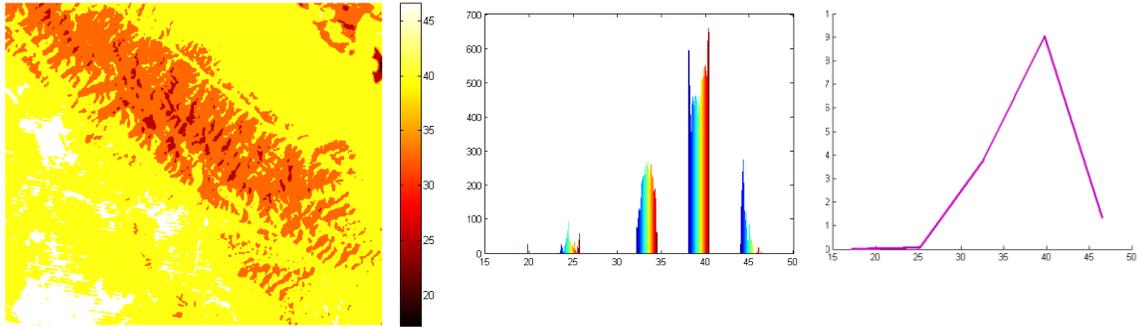


Figura 32. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2010 día: 079. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

\bar{x} : 38.3 \tilde{x} :39.8 σ : 4.1 (d)



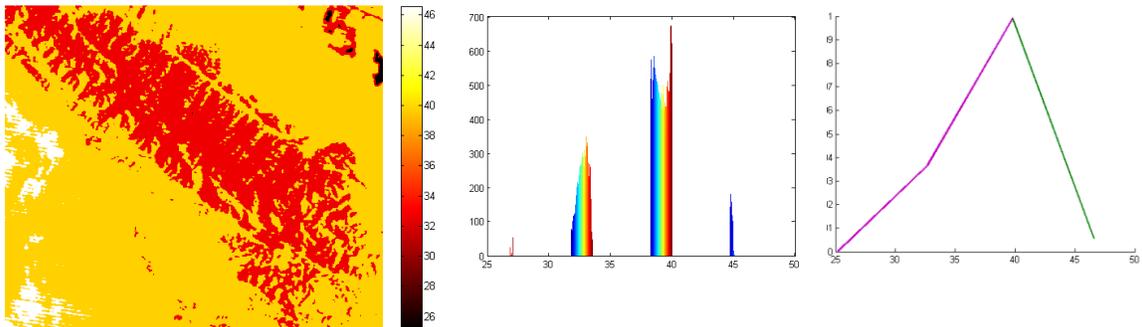
(a)

(b)

(c)

Figura 33. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2010 día: 127. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

\bar{x} : 37.9 \tilde{x} :39.8 σ : 3.5 (d)



(a)

(b)

(c)

Figura 34. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2010 día: 191. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

\bar{x} : 29.6 \tilde{x} :37.2 σ : 4.3

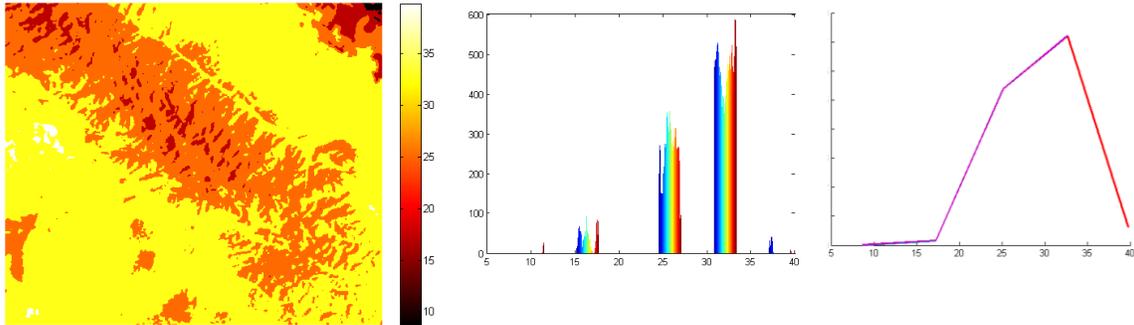


Figura 35. Dinámica de la temperatura de la escena año: 2011 día: 114. (a) Mapa de temperatura, (b) Histograma de temperatura, (c) Grafica de distribución de temperatura, (d) Valores media aritmética, mediana y desviación estándar.

Los datos obtenidos permiten representar la dinámica referente a la temperatura en una serie de tiempo, en donde se puede apreciar una gran variabilidad en el comportamiento de agrupación en la temperatura que proporciona las gráficas de distribución. Sin embargo estos resultados no arrojaron un comportamiento distintivo o evidencia de una relación de entre las temperaturas obtenidas y su distribución con la dinámica sísmica de la zona. Por lo que se puede determinar que con base a la técnica implementada para el análisis de imágenes satelitales de la banda térmica, los datos de la temperatura superficial no presentan relación con los eventos sísmicos de la zona.

4.2. Lineamientos

Mediante la aplicación computacional ADALGEO, se realizó un análisis comparativo entre los resultados del conjunto de imágenes referenciadas en la Tabla 9, para estudiar los cambios en los patrones de lineamientos causados por la actividad sísmica, teniendo como punto central el fenómeno sísmico del 4 de Abril de 2010, de magnitud de 7.2 Mw. Con la característica distintiva del periodo de tiempo considerado a evaluar, es decir, se consideró un mayor tiempo y por ende un número mayor de imágenes que evaluar, sobre estudios previos aplicados de esta técnica. Lo que permitió no solo analizar el comportamiento en relación con el sismo de 4 de Abril de 2010, sino otros eventos sísmicos con influencia en la zona de observación y dar una mayor robustez a los resultados de la experimentación. Otra singularidad de esta investigación es las características tectónicas de la zona de estudio, ya que este es un límite transformante de fallas con desplazamiento lateral y normales, contrastando con las áreas previamente analizadas con esta técnica, identificadas como zonas de subducción.

Para el estudio, se utilizaron la banda 4 y banda 5, que con base a las referencias citadas sobre lineamientos por esfuerzos, permiten una mejor caracterización de este proceso, estas fueron procesadas en múltiples experimentos para establecer los valores de los parámetros de procesamiento en ADALGEO, que generan los mejores resultados respecto a la dinámica buscada. Los valores finales encontrados para los parámetros (descripción en la Tabla 8) usados para la extracción de lineamientos son presentados a continuación en la Tabla 12.

Tabla 12. Valores de parámetros especificados para la extracción de lineamientos

Parámetro	Valor
Direcciones	12
Umbral	14
Diámetro	25
Largo Mínimo	0.1

Hough Peaks	200
FillGap	5

Como resultado del experimento se obtuvieron sobre cada imagen analizada un mapa con la superposición de los lineamientos extraídos sobre la imagen evaluada, un mapa de los lineamientos obtenidos, un diagrama de rosas y un mapa de densidad.

En la Figura 36, Figura 37, Figura 38 y Figura 39 se muestran los resultados obtenidos del tratamiento de las imágenes para la caracterización de la dinámica de lineamientos por esfuerzos para la banda 4.

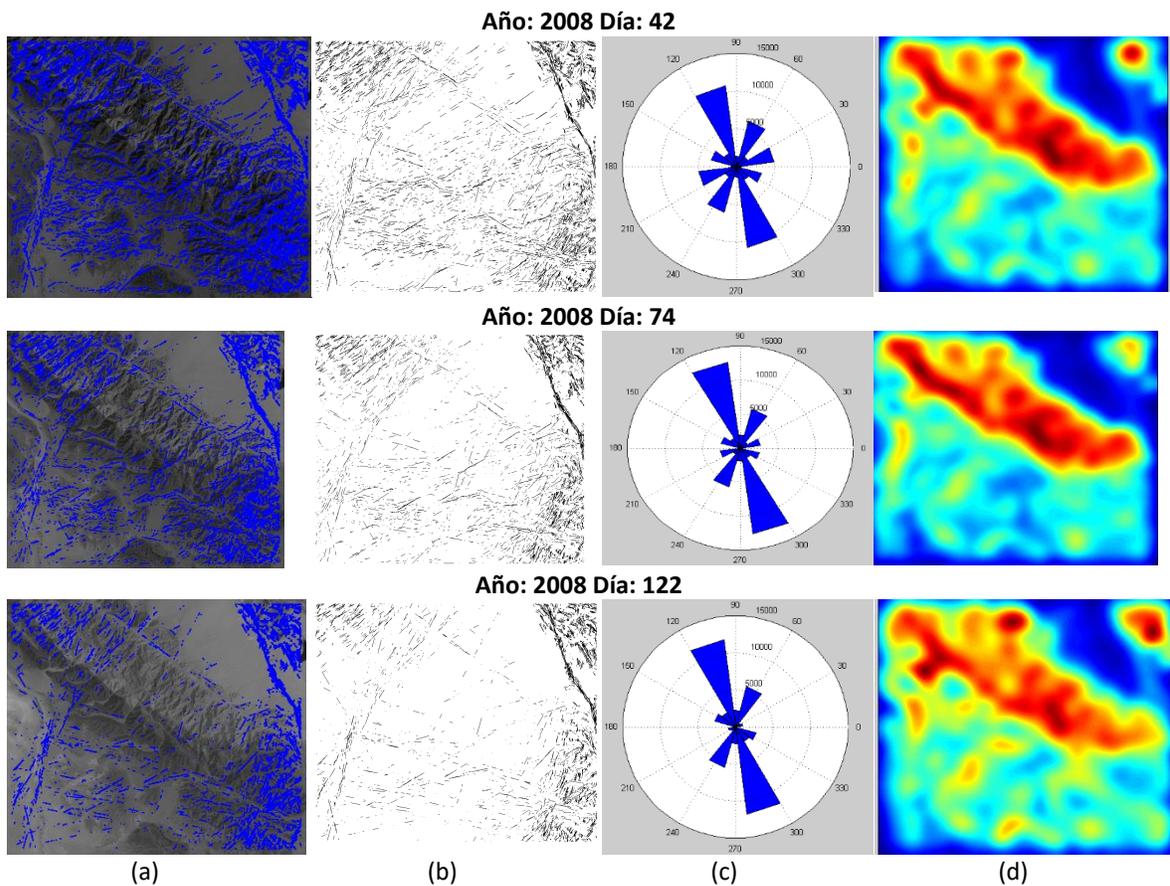


Figura 36. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 4. Escena año: 2008 día: 42, año: 208 día: 74, año: 2008 día: 122. (a) Mapa con superposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.

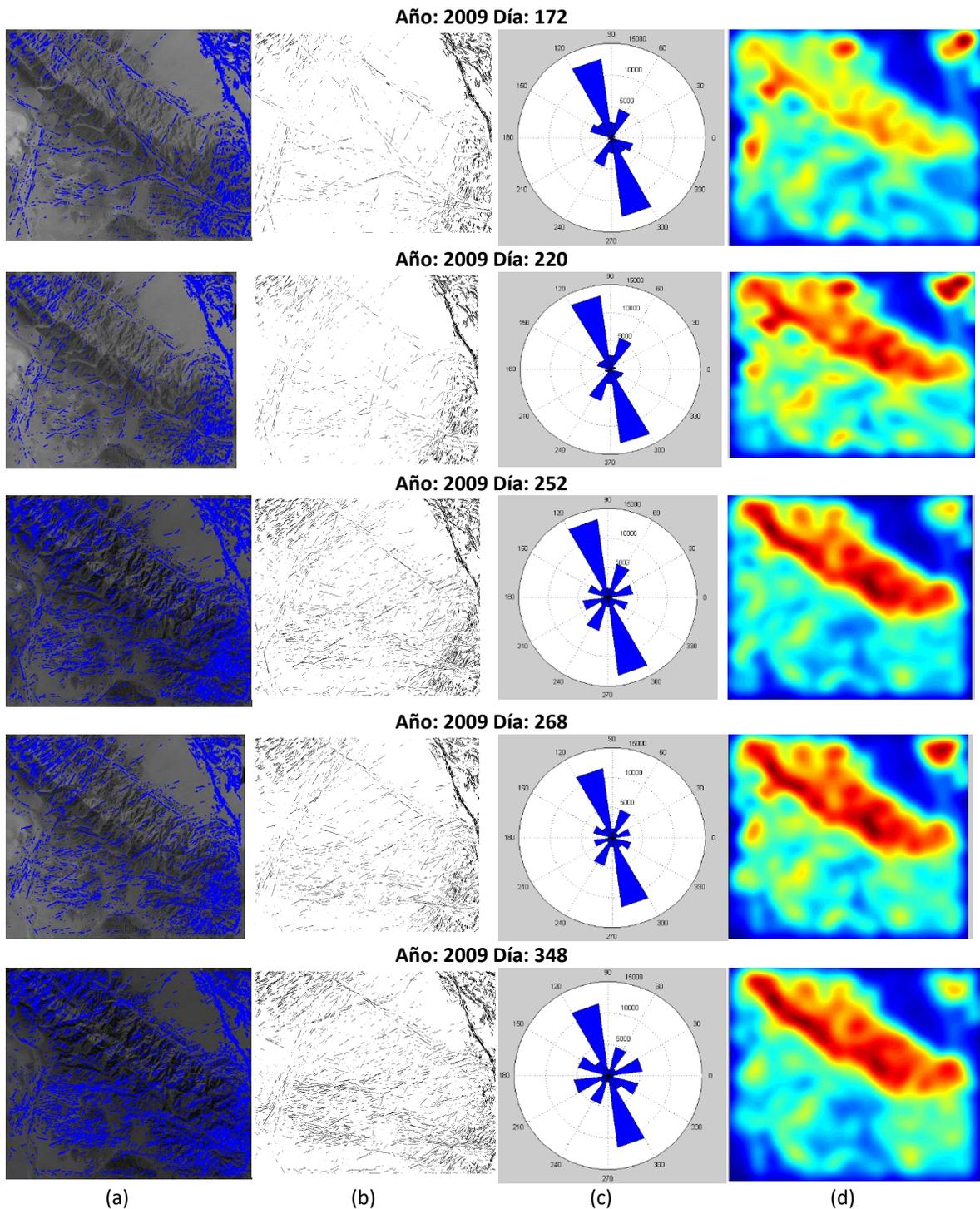


Figura 37. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 4. Escena año: 2009 día: 172, año: 2009 día: 220, año: 2009 día: 252, año: 2009 día: 268, año: 2009 día: 348. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.

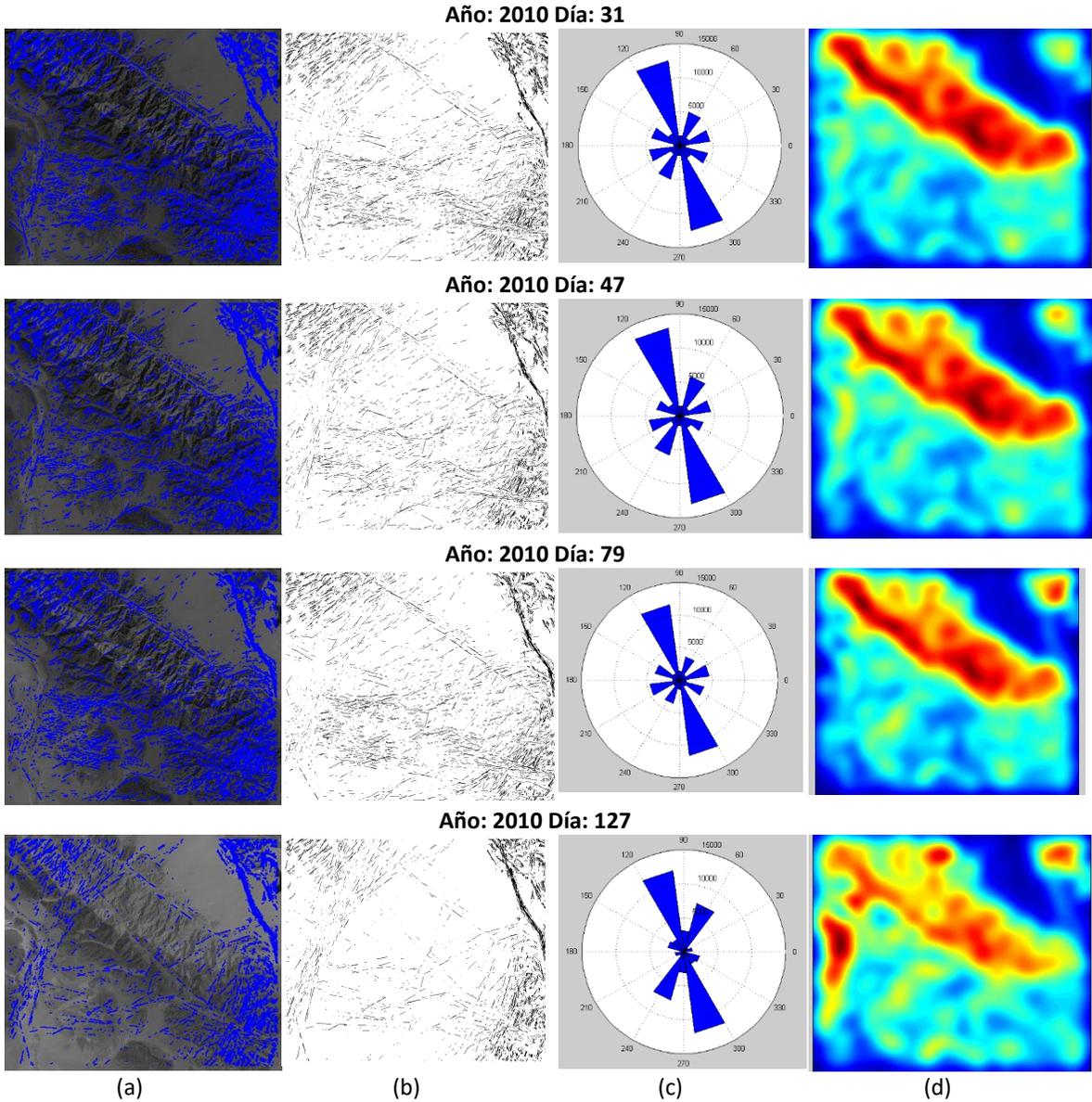


Figura 38. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 4. Escena año: 2010 día: 31, año: 2010 día: 47, año: 2010 día: 79, año: 2010 día: 127. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.

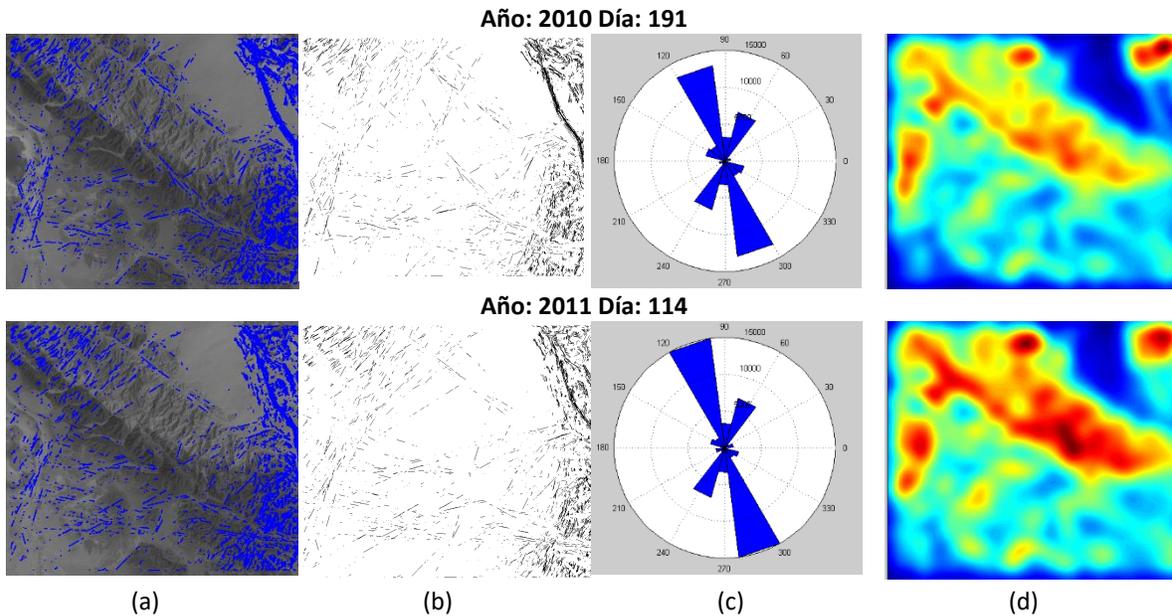


Figura 39. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 4. Escena año: 2010 día: 191, año: 2011 día: 114. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.

A continuación en la Figura 40, Figura 41, Figura 42 y Figura 43 se muestran los resultados derivados del procesamiento de las imágenes para la banda 5.

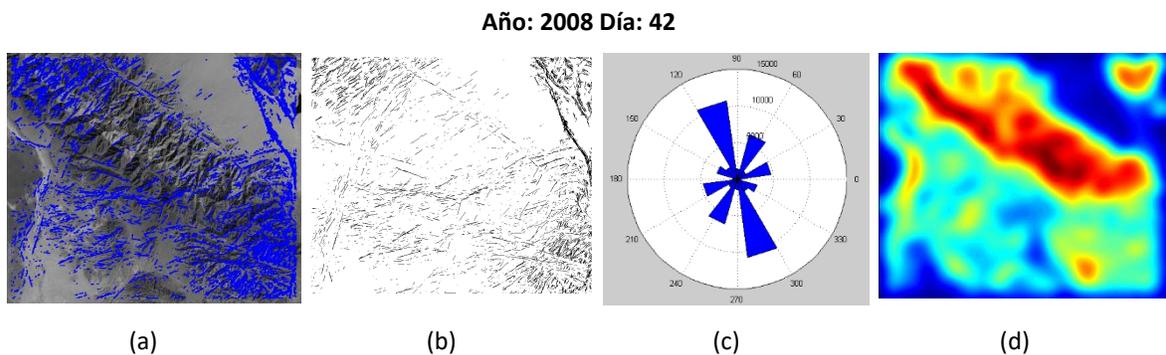
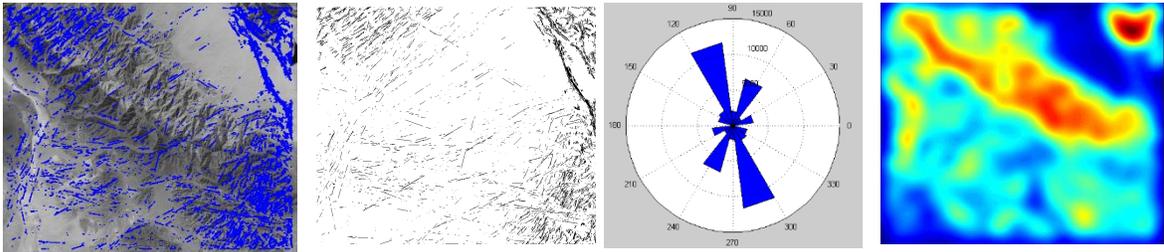
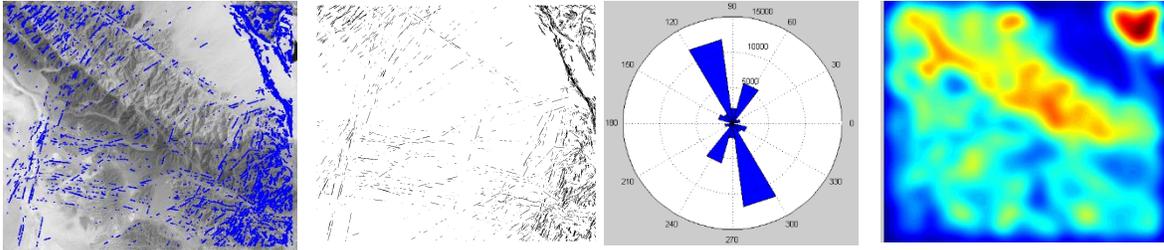


Figura 40. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 5. Escena año: 2008 día: 42. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.

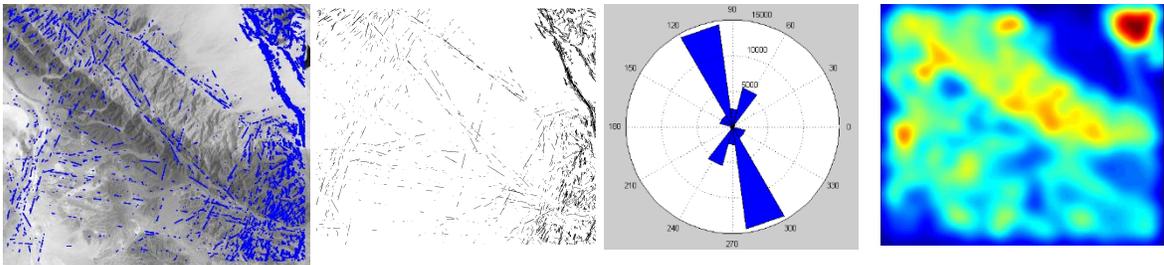
Año: 2008 Día: 74



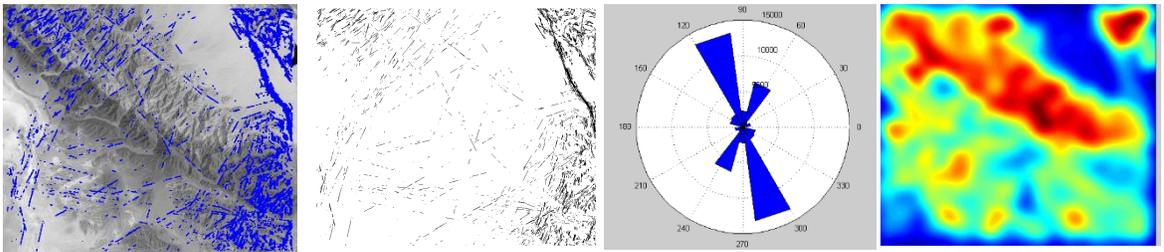
Año: 2008 Día: 122



Año: 2009 Día: 172



Año: 2009 Día: 220



(a)

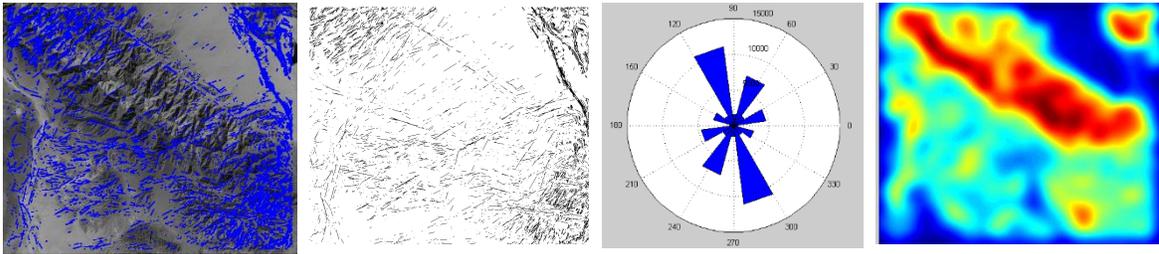
(b)

(c)

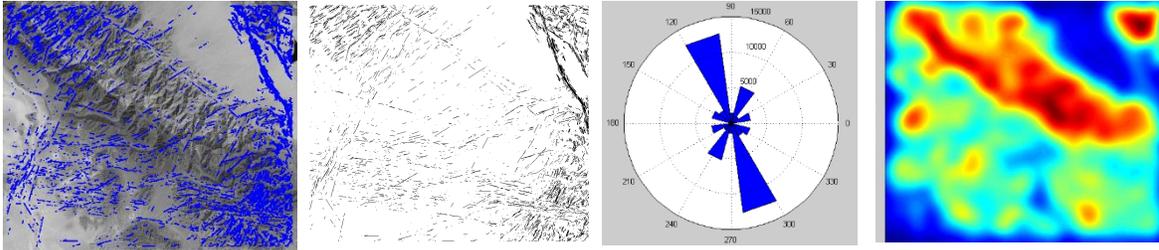
(d)

Figura 41. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 5. Escena año: 2008 día: 42, año: 2008 día: 74, año: 2008 día: 122, año: 2009 día: 172, año: 2009 día: 220. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.

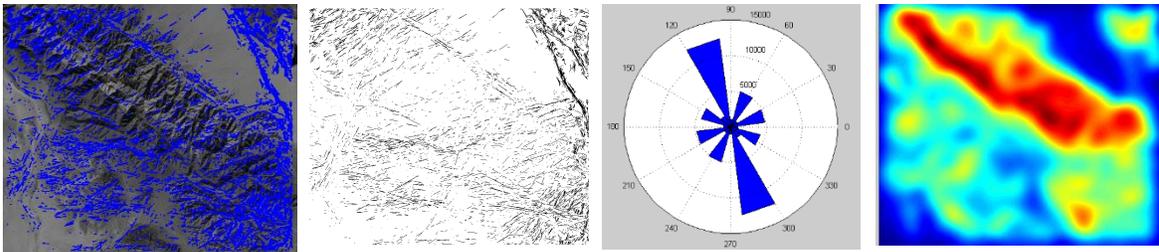
Año: 2009 Día: 252



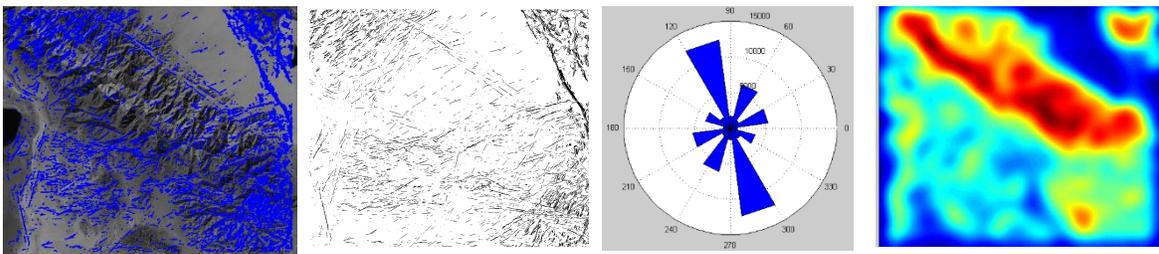
Año: 2009 Día: 268



Año: 2009 Día: 348



Año: 2010 Día: 31



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 42. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 5. Escena año: 2009 día: 252, 2009 día: 268, año: 2009 día: 348, año: 2010 día: 31. (a) Mapa con sobreposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.

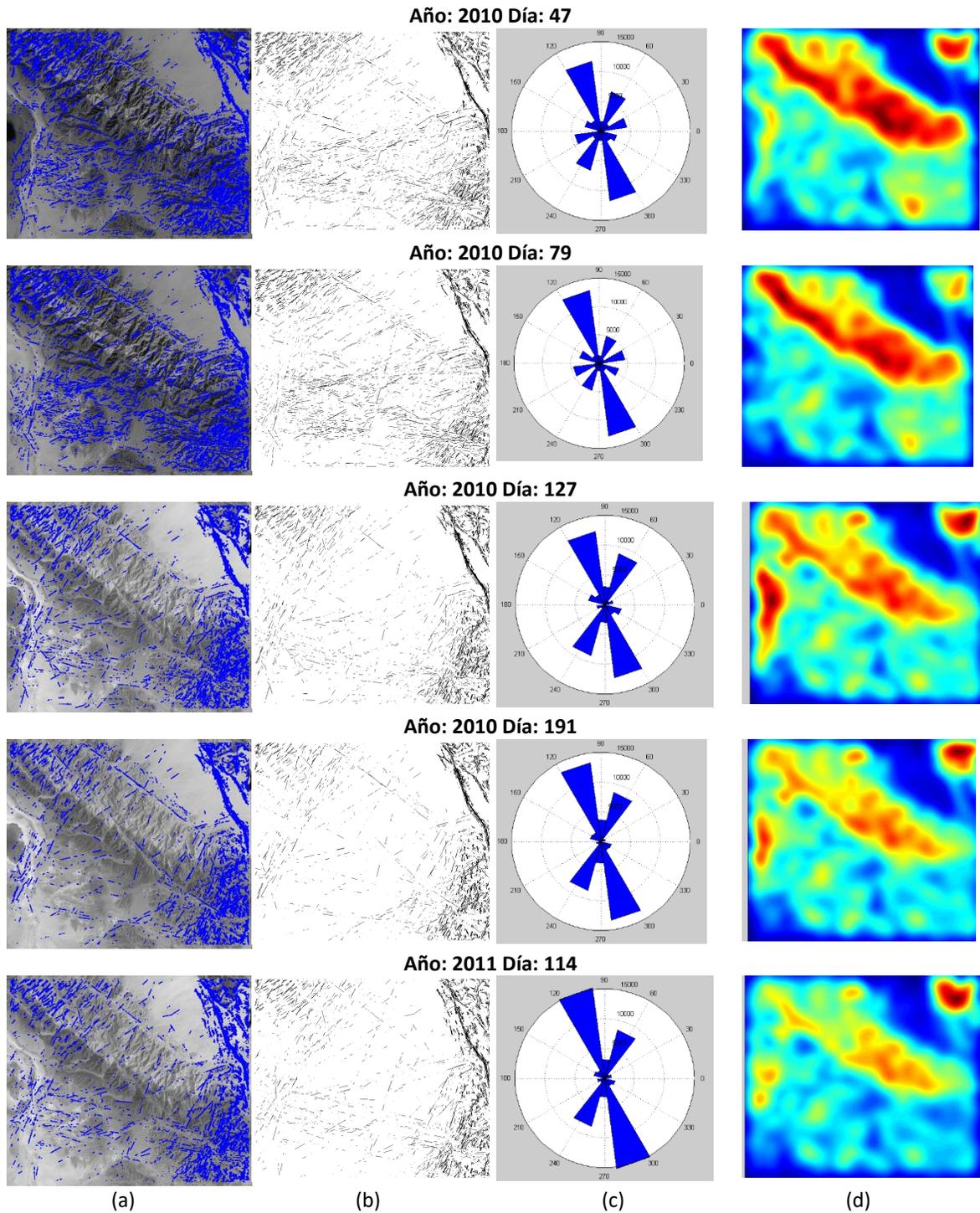


Figura 43. Dinámica de lineamientos mediante el procesamiento de la banda 5. Escena año: 2010 día: 47 año: 2010 día: 79, año: 2010 día: 127, año: 2010 día: 191, año: 2011 día: 114. (a) Mapa con superposición de los lineamientos, (b) Mapa de lineamientos, (c) Diagrama de rosas, (d) Mapa de densidad.

En las figuras situadas entre los índices Figura 36 a Figura 39 y Figura 40 a Figura 43, se observa el resultado del tratamiento aplicado en las imágenes de las banda 4 y 5 respectivamente, presentando respuestas muy similares entre ellas, pero con diferencias sutiles en relación a una mayor concentración de lineamientos observables desde el mapa de lineamientos, lo cual se puede apreciar de manera global en la Figura 44, y orientaciones más pronunciadas que se distinguen en el diagrama de rosas, al respecto de la banda 5 con la banda 4, distinciones que al final no alteraran en mayor medida la caracterización de la dinámica del área.

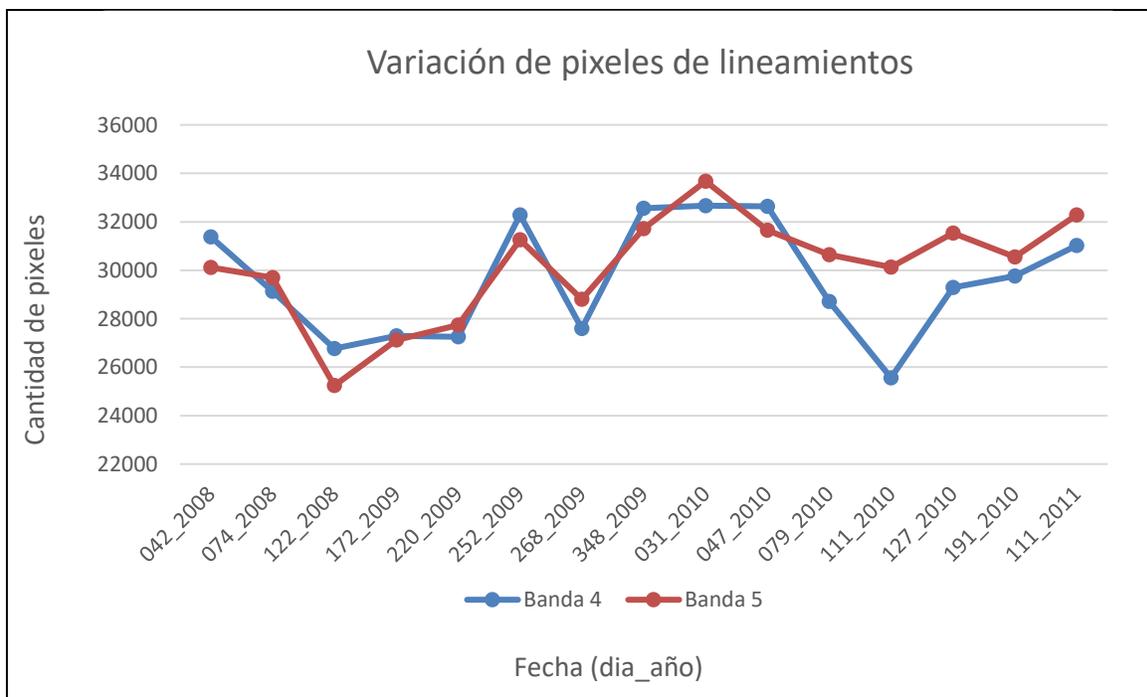


Figura 44. Variación de cantidad de pixeles de lineamientos a lo largo de la serie de tiempo.

En lo que respecta de los resultados obtenidos de la experimentación con la morfología de la zona, muestran una correlación importante de los lineamientos extraídos con los lineamientos físicos de la zona, lo cual puede ser observado en los mapas de sobreposición, mientras los diagramas de rosas exponen la orientación de los lineamientos, representados

en un sentido predominante noroeste (NW), que concuerdan con las características geológicas del área.

El análisis temporal, muestra a su vez cambios en la densidad y la orientación de lineamientos de manera perpendicular a los lineamientos predominantes, presentando un incremento y disminución considerable en el número de lineamientos extraíbles de la escena cuando esta se acerca y se aleja respectivamente a la fecha del sismo del 4 de Abril de 2010 de 7.2 Mw. Pero también se puede visualizar este comportamiento en determinados lapsos de tiempo no inmediatos a este evento sísmico.

Al analizar la actividad sísmica de la zona, este comportamiento al parecer se ve influenciado por eventos sísmicos importantes (≥ 5 Mw) en zonas adjuntas del área de estudio, los cuales se encuentran identificados en la Tabla 5 y Figura 16. Asumiendo la factibilidad de conocer un aproximado de la amplitud del radio de afectación de un sismo en relación a su magnitud [57] [12], es posible considerar su influencia en la dinámica resultante. Relación que es descrita en la Tabla 13.

Tabla 13. Relación entre la magnitud y amplitud de un sismo.

M	L (km)
3	1.1
4	3
5	8.3
6	23
7	62
8	170
9	470

La acumulación y liberación de esfuerzos generados por los sismos de febrero de 2008, tendrían una influencia sobre las escenas tratadas de los días 42, 74 y 112 del año 2008, donde la imagen del día 42 presenta una alta concentración de lineamientos al situarse un día posterior al sismo de 2008-02-09 y antecediendo de manera inmediata los eventos de las fechas 2008-02-11 y 2008-02-19, mientras en las subsecuentes escenas la cifra de lineamientos se ve disminuyendo gradualmente como consecuencia de la relajación de esfuerzos.

En lo que respecta a las escenas del año 2009, las imágenes de los días 172 y 220 presentan un estado de mínimos esfuerzos, configuración similar a la encontrada al día 112 de 2008. En cambio la escena tratada el día 252 ubicada a 8 días del sismo presenta una alta concentración de lineamientos, que se ve ligeramente disminuido en la siguiente escena del día 268. Para la imagen día 348, vuelve incrementarse el número de lineamientos, esto, relacionado con la inmediatez al evento sísmico de 2009-12-30. Posterior a este evento el análisis de las imágenes 31, 47 y 79 del año 2010 no presentan una disminución, sino un alto índice de lineamientos de manera muy uniforme, aunque esta última se encuentre muy cercana al evento de 7.2 Mw del 4 de Abril de 2010, lo que genera una singularidad en el análisis presentado en la configuración de esfuerzos, ya que se esperaría una concentración a un mayor que la escenas anteriores por su inmediatez al evento sísmico. En las escenas subsiguientes se presenta una disminución en el número de lineamientos, sin embargo con respecto a la configuración posterior al sismo, las imágenes toman una forma distinta que es contante en ellas y que podría asumirse a las deformaciones generadas como resultado de la magnitud del sismo.

Con estos resultados, se puede afirmar que con respecto a la pregunta de investigación, ¿La técnica para el estudio de lineamientos por esfuerzos, podrá generar resultados satisfactorios por las características de los borde de placas presentes en la zona de estudio?, si resulto posible la caracterización de la dinámica de lineamientos por esfuerzos para el

borde de placas presentes en el área de estudio, generando una caracterización con orientación en correspondiente con las características de las fallas y fracturas de la zona.

Para el cuestionamiento, ¿El estudio de la dinámica lineamientos por esfuerzos evaluados en un periodo de tiempo mayor a los estudios referentes de este mecanismo en el estado del arte, resultaran congruentes con la actividad sísmica de la zona?, se puede afirmar que si existe una fuerte relación de la dinámica de lineamientos por esfuerzos con la actividad sísmica del área de estudio, es decir el aumento y disminución de lineamientos se vio afectado por la conformación sísmica directa y adyacente de la zona, en un radio de influencia derivado de las magnitudes de los esfuerzos sísmicos, presentándose ciertas singularidades, como el caso del periodo final de 2009 hasta abril de 2010 de una constante en el índice de agrupación de lineamientos, y el hecho de la escena previa al evento de 4 de Abril de 2010 de no presentar una concentración significativa mayor a las antecesoras.

4.3. Deformación de la corteza

Partiendo de la configuración de las estaciones de medición continua y las estaciones de referencia, especificadas en la Tabla 10 y Tabla 11, GAMIT/GLOBK es el software utilizado para el análisis, que por su especialización en estaciones GPS, que son la totalidad de las estaciones que se consideraron para el experimento. Con base en ello se obtuvieron los archivos y datos requeridos (ver [55]). El ITRF2008 fue el marco de referencia de los vectores de velocidad implementado. En el caso de los archivos RINEX, estos fueron ajustados a un intervalo de 30 segundos, con la finalidad de reducir el ruido en los datos de las mediciones para las características del estudio en relación con el comportamiento de los esfuerzos sísmicos.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del procesamiento de la configuración de estaciones de medición continua GPS tratada con GAMIT/GLOBK. Donde la Tabla 14 concentra las velocidades registradas por cada una de las estaciones CGPS, mientras la dinámica presentada en la serie de tiempo es ilustrada en la Figura 45, Figura 46, Figura 47, que corresponden a las estaciones CGPS MEXI, P500, P494 y P066 respectivamente.

Tabla 14. Velocidades de las estaciones en la serie de tiempo tratadas.

Estación	Eje	$v_{mm/y}$	$\sigma_{mm/y}$	Eje	$v_{mm/y}$	$\sigma_{mm/y}$	Eje	$v_{mm/y}$	$\sigma_{mm/y}$
MEXI	Norte	-49.23	0.91	Este	29.20	0.85	Vertical	-21.90	0.37
P500	Norte	-31.48	0.40	Este	11.89	0.38	Vertical	4.58	0.10
P494	Norte	-68.50	1.11	Este	-10.19	0.37	Vertical	11.98	0.21
P066	Norte	16.40	0.04	Este	-69.63	0.42	Vertical	-3.80	0.10

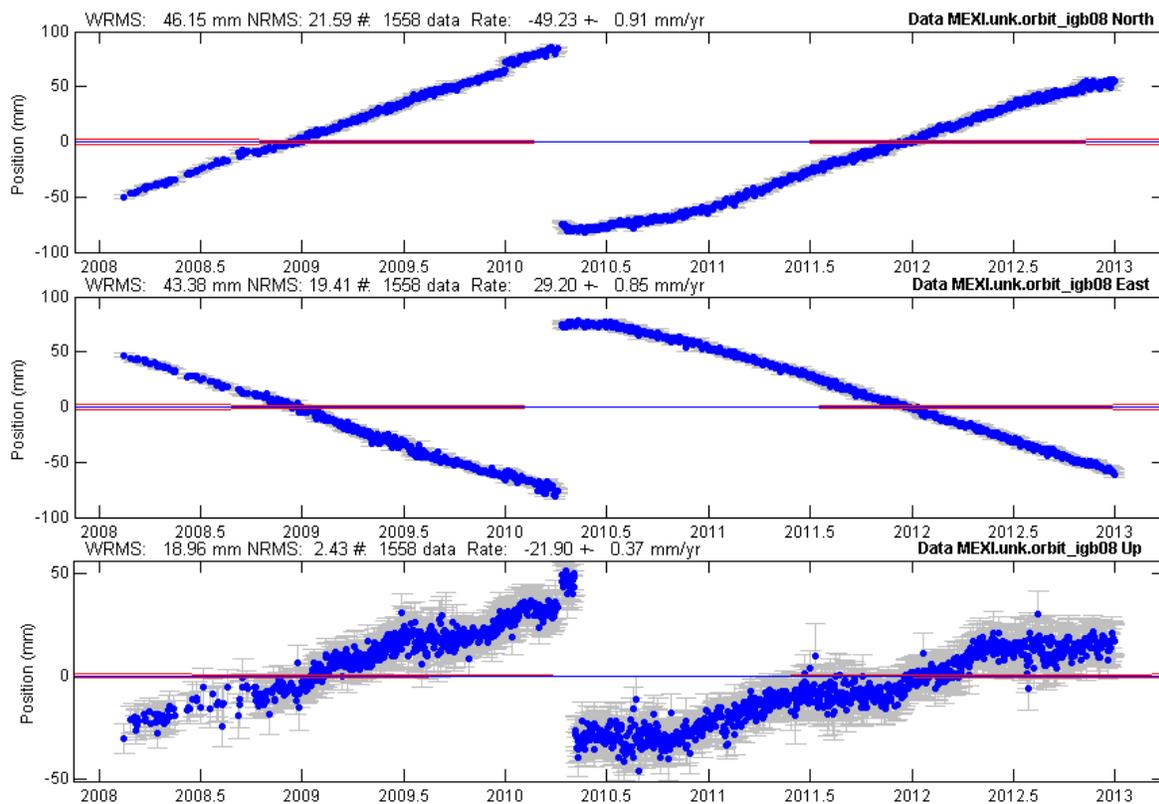


Figura 45. Serie de tiempo para la estación CGPS MEXI (Mexicali, BC)

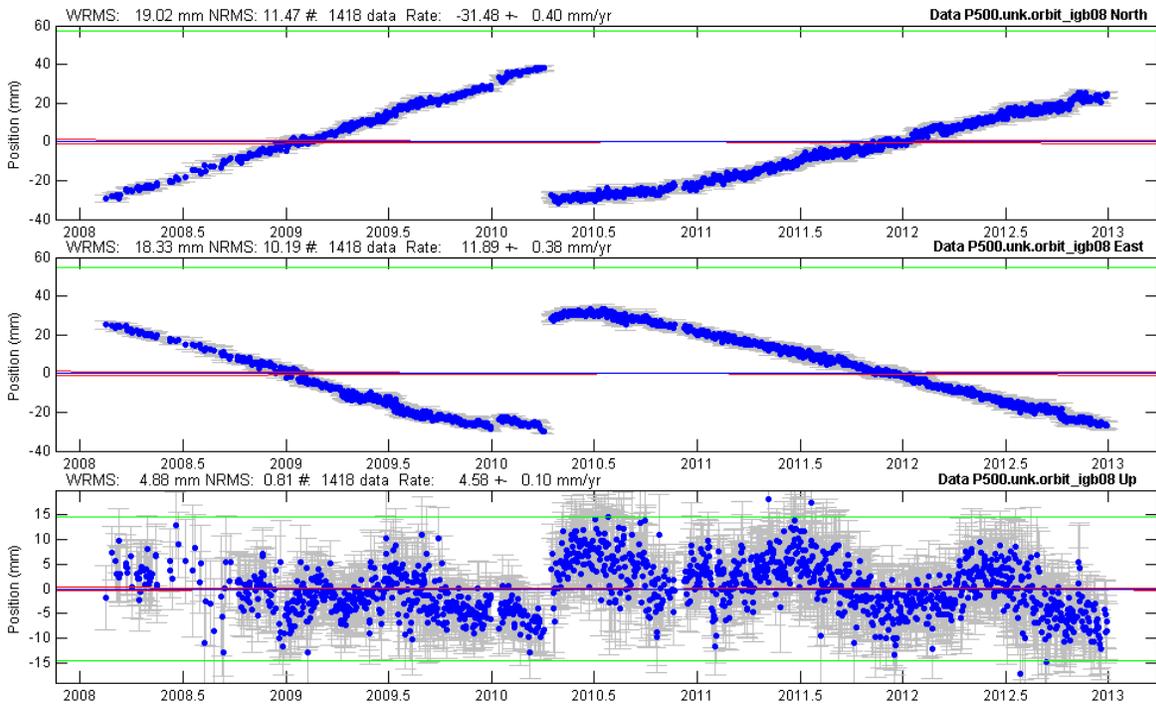


Figura 46. Serie de tiempo para la estación CGPS P500 (El Centro, CA)

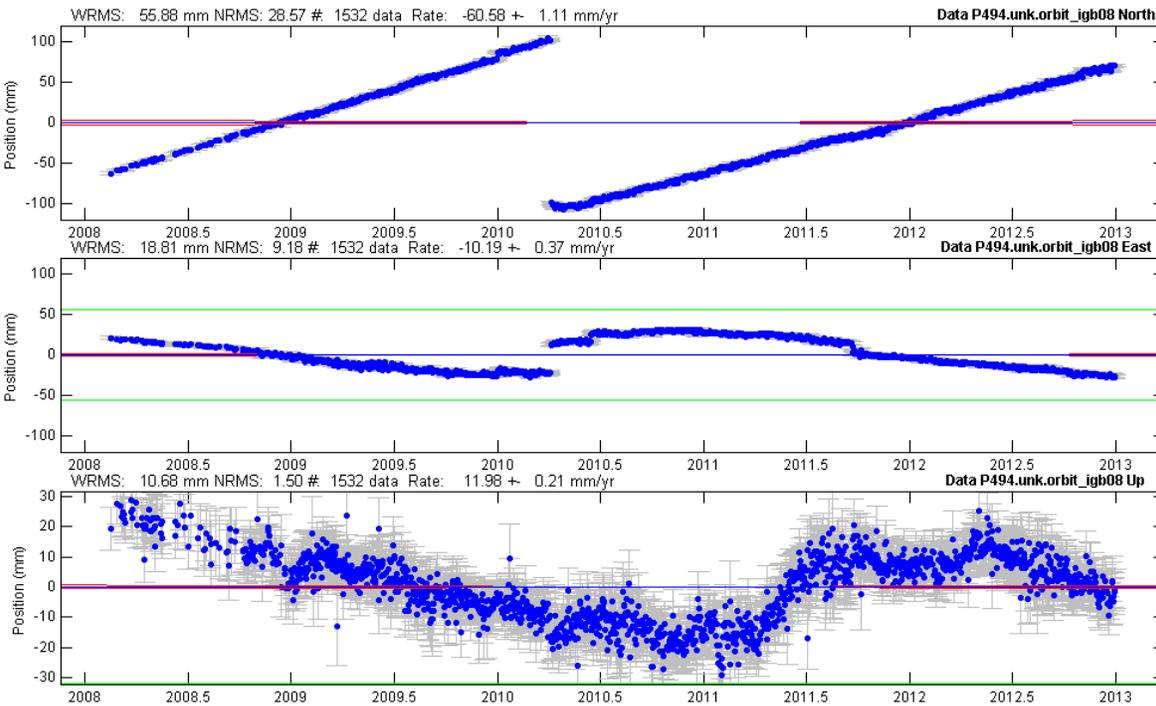


Figura 47. Serie de tiempo para la estación CGPS P494 (El Centro, CA)

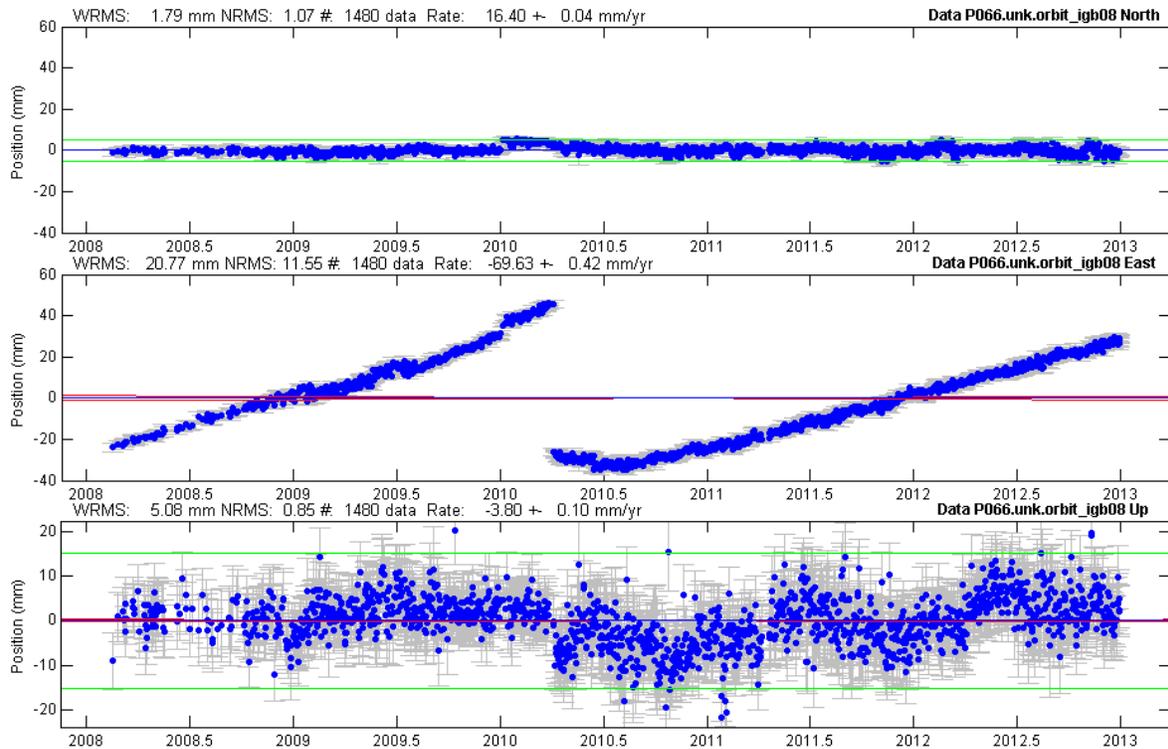


Figura 48. Serie de tiempo para la estación CGPS P066 (Jacumba, CA)

En las series de tiempo finales resultantes del experimento, se aprecia claramente un salto o discontinuidad importante generada por el sismo de abril de 2010 y de manera mucho menor una discontinuidad relacionada con el sismo de diciembre de 2009. La estación MEXI, la cual se ubica de manera más próxima al área del foco sísmico, muestra un salto más pronunciado en cada uno de sus ejes con los que respecta a la demás estaciones de estudio. En lo que respecta a la orientación de su desplazamiento, MEXI presenta un sentido noroeste. Resultados muy similares son los que presenta la estación P500, la cual es la siguiente con respecto a distancia. Mientras la estación P494 muestra un mayor salto en su eje norte en contraparte de su eje este, y un desplazamiento al igual que MEXI y P500 de sentido noroeste, las tres estaciones situadas en la placa de norteamericana. Por su parte la estación P066, que se encuentra posicionada hacia la placa del pacífico, en su eje norte no presenta variaciones significativas, contrastando el importante salto en su eje este, y una orientación con dirección al este.

5. Conclusiones y Recomendaciones

Con base al resultado del estudio y análisis de la temperatura superficial de manera remota mediante la banda térmica del sensor Landsat 5 TM, se puede concluir que no existen indicios claros con posibilidades a relacionar con la dinámica sísmica, a pesar de verse presentado actividad hidrotermal importante por el sismo de 7.2Mw del 4 de abril de 2010. Esta es una línea de investigación muy importante que quizás requiera de mayor atención y profundidad en su análisis para trabajos futuros.

Con respecto al estudio de los lineamientos por esfuerzos, el análisis arrojó una caracterización de la zona de estudio hasta cierto punto congruente con los resultados expuestos en otros trabajos de investigación donde se utilizó esta técnica [2] [3] [12] [13] [18]; es decir, se logró representar un comportamiento en el aumento y disminución de lineamientos con base a la actividad sísmica, como se puede observar en la sección 4.2. Además se pudo determinar que en la zona de lineamientos por esfuerzos presenta un sentido perpendicular al sentido de los lineamientos geológicos del área. Sin embargo, las características de los lineamientos no resultaron con dimensiones tan pronunciadas como en algunos de éstos, lo que podría estar asociado con la morfología del área. Otra distinción, es el hecho que para las escenas inmediatas al evento del 4 de abril de 2010 (días 31 ,47 y 79), no presentan una variación importante entre ellas, es decir la escena del día 79 a pesar de ser la más inmediata al suceso sísmico no presenta una mayor extracción de lineamientos, hecho que no se ha especificado en algún estudio, y un comportamiento para considerar en trabajos de investigación posteriores. Otra conclusión importante sobre lineamientos, es que al establecerse un periodo de tiempo de evaluación mayor con respecto a los antecedentes de estudio, se pudo observar las implicaciones actividad sísmica adjunta a la zona. En otras palabras, sobre todo se puede concluir que la aplicación de lineamientos es una técnica que puede ser factible para el análisis de la dinámica de la zona con respecto a la actividad sísmica, pero sin lograr ser aun algo contundente, ya que

requiere de una calibración previa de los valores para su evaluación que resulta variante en dependencia a la morfología de la zona, de lo cual no hay un fuerte referente, además se necesitan análisis en series de tiempos más amplias con respecto a los existentes en la actualidad, para que dé robustez a esta técnica y pueda tener respuestas con mayor certidumbre sobre singularidades que se presentan a lo largo de un periodo mayor de observación.

Finalmente, en lo que respecta al análisis de la series de tiempo, se puede concluir que las estaciones MEXI, P500, P494, ubicadas en puntos más próximos de la zona de Cucapah, muestran concordancia entre su sentido de desplazamiento con la orientación de los lineamientos geológicos del área, que son en la dirección noroeste. Mientras en la dirección este de la zona, la estación P066 permite la posibilidad de interpretar el comportamiento en el área del pacifico para un análisis de sus movimientos e implicación en los lineamientos por esfuerzos que resultan perpendiculares a los geológicos del área de Cucapah. Sobre todo, podemos concluir que existe una importante correlación con los lineamientos y las series de tiempo para la zona investigada; sin embargo, se requiere mayor trabajo de investigación en esta área que permita la validación de ambas técnicas propuestas.

6. Referencias

- [1] G. Gorshkov y A. Yakushova, *Geologia General*, Moscu: Editorial MIR, 1970.
- [2] A. A. Arellano Baeza, M. E. Trejo Soto y R. García Victorino, «Use of high Resolution satellite images for tracking of changes in the lineament structure, caused by earthquakes,» *Journal of Earth Sciences*, pp. 1-10, 2007.
- [3] A. A. Arellano Baeza, M. E. Trejo Soto, R. García Victorino y A. Martínez Bringas, «Use of the ASTER satellite images for evaluation of structural changes in the Popocatepetl volcano related to microseismicity,» *Advances in Space Research*, vol. 43, pp. 224-230, 2009.
- [4] R. C. Gonzalez y R. E. Woods, *Digital Image Processing*, E.U.A: Addison Wesley, 2002.
- [5] H. EGILL, S. JOANN, H. KATE, Y. J. A.-V. WENZHENG y K. HIROO, «The 2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah Earthquake Sequence, Baja California, Mexico and Southernmost California, USA: Active Seismotectonics along the Mexican Pacific Margin,» *Pure Appl. Geophys*, vol. 168, pp. 1255-1277, 2011.
- [6] C. Soto Pinto, «Sistema de análisis automático de imágenes satelitales para el estudio de la dinámica de la corteza terrestre,» Universidad de Santiago de Chile, Santiago de Chile, 2014.
- [7] M. O. Cotilla Rodríguez, D. Córdoba Barba y M. Herraiz Sarachaga, «Main morphotectonic characteristics of Asturias, Spain,» *Geofísica Internacional*, vol. 44, nº 1, pp. 65-101, 2005.
- [8] A. Masoud y K. Koike, «Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt,» *Journal of African Earth Sciences*, vol. 45, p. 467-477, 2006.
- [9] E. S. Papadaki, S. Mertikas y A. Sarris, « Identification of lineaments with possible structural origin using ASTER images and DEM derived products in Western Crete, Greece,» *EARSel eProceedings*, vol. 10, pp. 9-26, 2011.
- [10] M. Marghany y M. Hashim, «Lineament mapping using multispectral remote sensing,» *International Journal of the Physical Sciences*, vol. 5, pp. 1501-1507, 2010.
- [11] S. N. A. G. Anwar Abdullah, «Landsat ETM-7 for Lineament Mapping using Automatic Extraction Technique in the SW part of Taiz area, Yemen,» *Global Journal of HUMAN SOCIAL SCIENCE*, vol. 13, pp. 34-38, 2013.

- [12] A. A. Arellano Baeza, A. Zverev y M. V.A., «Study of changes in the lineament structure caused by earthquakes in South America by applying the lineament analysis to the Aster(Terra) satellite data,» *Elsevier*, vol. 37, pp. 690-697, 2006.
- [13] L. V. Bondur, «Satellite Monitoring of Seismic Hazard Area Geodynamics Using The Method of Lineament Analysis,» de *31st International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Saint Petersburg, Russian Federation, 2005.
- [14] J. Wang y P. J. Howart, «Use the Hough Transform in Automated Lineament Direction,» *Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, nº 4, pp. 561-566, 1990.
- [15] C. John, «A Computational Approach to Edge Detection,» *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*, vol. 8, nº 6, pp. 679-698, 1986.
- [16] A. Masoud y K. Koike, «Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data,» *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 66, p. 818–832, 2011.
- [17] S. M, V. N y N. K. Babu, «A Review of Various Lineament Detection Techniques for high resolution Satellite Images,» *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 4, nº 3, pp. 72-78, 2014.
- [18] C. Soto Pinto, A. A. Arellano Baeza y G. Sánchez, «A new code for automatic detection and analysis of the lineament patterns for geophysical and geological purposes (ADALGEO),» *Computers & Geosciences*, vol. 57, p. 93–103, 2013.
- [19] R. Mehdi y G. Richard, «TecLines: A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 1: Line Segment Detection and Extraction,» *remote sensing*, vol. 6, pp. 5938-5958, 2014.
- [20] A. A. ZLATOPOLSKY, «DESCRIPTION OF TEXTURE ORIENTATION IN REMOTE SENSING DATA USING COMPUTER PROGRAM LESSA,» *Computers & Geoscienc*, vol. 23, nº 1, pp. 45-62, 1997.
- [21] A. M. Casas, Á. L. Cortés, A. Maestrosa, M. A. Sorianoa, A. Riaguasc y J. Bernal, «LINDENS: A program for lineament length and density analysis,» *Computers & Geosciences*, vol. 26, pp. 1011-1022, 2000.
- [22] H. Azizi, M. Tarverdi y A. Akbarpour, «Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran,» *Advances in Space Research*, vol. 46, p. 99–109, 2010.

- [23] D. J. PÉREZ, P. E. D. BENITES y M. C. GODEAS, «RECONOCIMIENTO DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL CON EL SENSOR ASTER, EN EL CURSO MEDIO DEL RÍO SANTA CRUZ (31°40'S), PROVINCIA DE SAN JUAN,» *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 66, nº 4, pp. 623 - 633, 2010.
- [24] D. T. Inés y R. Nora, «Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina,» *ORE GEOLOGY*, vol. 32, p. 275–290, 2007.
- [25] A. Rayana, R. Fernandes, H. Khalil, S. Mahmouda, J. Miranda y A. Tealaba, «Evaluation of the crustal deformations in the northern region of Lake Nasser(Egypt) derived from 8 years of GPS campaign observations,» *Journal of Geodynamics*, vol. 49, pp. 210-215, 2010.
- [26] R. Federica, P. Grazia, P. Antonio y M. M. Salah, «Current motion and short-term deformations in the Suez–Sinai area from GPS observations,» *Journal of Geodynamic*, vol. 41, pp. 485-499, 2006.
- [27] N. D. Agostino y S. Giulio, «Crustal motion along tge Eurasia-Nubia plate boundary in the Calabrian Arc and Sicily and active extension in the Messina Staits from GPS measurements,» *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, vol. 109, nº 4, pp. 1-16, 2004.
- [28] W. Guo-Quan, B. David, T. Guoqing y Z. Xiyuan, «Comparisons of ground motions from colocated and closely spaced one-sample-per-second global positioning system and accelerograph recordings of the 2003 M 6.5 San Simeon, California, earthquake in the Parkfield region.,» *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 97, nº 1B, pp. 76-96, 2007.
- [29] T. Tomoji, «High-rate precise point positioning: observation of crustal deformation by using 1-Hz GPS data.,» 2006.
- [30] C. Vigny y e. al., «The 2010 Mw 8.8 Maule megathrust earthquake of Central Chile, monitored by GPS,» *Science*, vol. 332, nº 6036, pp. 1417-1421, 2011.
- [31] G. G. Wuxing y Wang, «Far-field crustal movements before and after the 2011 Ms9. 0 Japan earthquake from GPS observations,» *Geodesy and Geodynamics*, vol. 2, nº 3, pp. 1-7, 2011.
- [32] Y. Ohta, I. Meilano, T. Sagiya, F. Kimata y K. Hirahara, «Large surface wave of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake captured by the very long baseline kinematic analysis of 1-Hz GPS data,» *Earth Planets Space*, vol. 58, pp. 153-157, 2006.
- [33] S. Franco Sanchez, «Redes GPS en Mexico y su aplicacion en la sismotectonica,» Universidad Autonoma Nacional de Mexico, Mexico, 2006.

- [34] J. L. Chávez, Tratamiento digital de imágenes multiespectrales, Mexico: Instituto de Geofísica UNAM, 2010.
- [35] D. P. Argialas y O. D. Mavrantza, «COMPARISON OF EDGE DETECTION AND HOUGH TRANSFORM TECHNIQUES FOR THE EXTRACTION OF GEOLOGIC FEATURES,» *Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, pp. 790-795, 2004.
- [36] E. Cuevas, D. Zaldivar y M. Perex, Procesamiento de imágenes con MATLAB y Simulink, Mexico D.F.: Alfaomega, 2014.
- [37] U. T. d. Pereida, «Observatorio Astronómico,» 25 Marzo 2015. [En línea]. Available: <http://observatorioastronomico.utp.edu.co/espectroscopia.html>. [Último acceso: 01 Agosto 2016].
- [38] E. Chuvieco, FUNDAMENTOS DE TELEDETECCION ESPACIAL, MADRID: Ediciones RIALP, S.A, 1995.
- [39] C. J. C. E. Hegarty, «Evolution of the Global Navigation Satellite System (GNSS),» *IEEE*, vol. 96, nº 12, pp. 1902-1917, 2008.
- [40] U. A. Force, «gps.gov,» U.S. Air Force, 14 01 2016. [En línea]. Available: <http://www.gps.gov/>. [Último acceso: 11 07 2016].
- [41] G. Vazquez Becerra, «NOTAS DE SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL,» UAS, Culiacán, 2011.
- [42] J. F. Zumberge, M. B. Heftin, D. Jefferson, M. M. Watkins y a. F. H. Webb, «Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks,» *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, vol. 102, nº B3, pp. 5005-5017, 1997.
- [43] E. J. Tarbuck y F. K. y. T. D. Lutgens, CIENCIAS DE LA TIERRA, Madrid: Pearson Educación S. A., 2005.
- [44] F. G. Chicote, «geohistorias,» [En línea]. Available: <http://geohistorias.wikispaces.com/TEMA+3.+LAS+FORMAS+DE+LA+TIERRA..> [Último acceso: 02 09 2016].
- [45] B. A. Bolt, Terremotos, Barcelona: Reverte, 1981.
- [46] M. Gutiérrez Claverol, Compendio de teledetección geológica, Oviedo: Universidad de Oviedo, 1993.

- [47] J. Pous y L. Jutglar, *ENERGIA GEOTERMICA*, Barcelona: Ediciones Ceac, 2004.
- [48] M. Cruz Castillo, «CATÁLOGO DE LAS FALLAS REGIONALES ACTIVAS EN EL NORTE DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO,» *GEOS*, pp. 37- 42, 2002.
- [49] J. Alvarez Rosales, J. M. Camacho Hernández, V. I. Gallardo Federico, G. Macías Valdez y D. Herrera Carrillo, «Características geológicas preliminares de la nueva zona termal Cucapah en el Valle de Mexicali, BC, México,» *Geotermia*, vol. 25, nº 2, pp. 21-27, 2012.
- [50] F. John M y S. Ronald M, «Patterns of Quaternary deformation and rupture propagation associated with an active low-angle normal fault, Laguna Salada, Mexico: Evidence of a rolling hinge,» *Geosphere*, vol. 5, pp. 385-407, 2009.
- [51] USGS, «Landsat Missions,» 15 08 2016. [En línea]. Available: http://landsat.usgs.gov/about_mission_history.php. [Último acceso: 20 08 2016].
- [52] G. Chander y B. Markham, «Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges,» *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, vol. 41, nº 11, pp. 2674-2677, 2003.
- [53] NASA, «Landsat 7 Science Data Users Handbook,» NASA, 2007.
- [54] MathWorks, «MathWorks,» 2 Agosto 2016. [En línea]. Available: <http://es.mathworks.com/products/matlab/>. [Último acceso: 2 Agosto 2016].
- [55] T. Herring, r. King y S. McClusky, «Introduction to GAMIT/GLOBK,» Department of Earth MIT, Massachusetts, 2015.
- [56] T. A. Herring, M. A. Floyd, R. W. King y S. C. McClusky, «Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program,» Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2015.
- [57] M. E. Trejo Soto, J. M. Espinosa Cardeña, J. Ramírez Hernández y V. García López, «SISTEMA DE MONITOREO GEODÉSICO SOBRE LA FALLA GEOLÓGICA ACTIVA IMPERIAL EN LA ZONA ORIENTE DE LA CD. DE MEXICALI, BC. : UNA PROPUESTA PARA EL MONITOREO Y CARACTERIZACION DE LAS DEFORMACIONES SUPERFICIALES SISMOGENICAS,» de *Congreso Nacional e Internacional de Ingenierías Topográfica, Geodésica y Geomática*, Puerto Vallarta, Jalisco, México, 2014.
- [58] W. Lowrie, *Fundamentals of Geophysics*, 2007: Cambridge University Press, Cambridge.
- [59] M. Miller, «Geofísica de la Tierra Sólida,» Universidad de Concepción, Concepción, 2015.

