

Extracción de lineamientos originados por estrés sísmico a través de imágenes de alta resolución

Lineament extraction originated by seismic stress with high resolution images

Rosendo Romero-Andrade*, Arturo Zazueta-Gambino****, José C. Beltrán-González***, José J. Uriarte-Adrián***, Manuel E. Trejo-Soto**, G. Esteban, Vázquez-Becerra*

*Maestro en Ciencias, Posgrado en Ciencias de la Información, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Prolongación Josefa Ortiz de Domínguez S/N, Cd. Universitaria, CP 80040, Culiacán de Rosales. Sinaloa, México. Correo: r.romero11@info.uas.edu.mx

**Doctor en Ciencias, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa

***Maestro en Ciencias, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa.

****Licenciado en Informática, Facultad de Informática Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa

Resumen

Durante la última década, se han presentado en el mundo sismos de gran intensidad causando catástrofes sobre la tierra, sin la posibilidad de ser prevenidos. Específicamente para el caso de México, se han presentado sismos que van de bajas hasta altas intensidades, como fue el caso del sismo ocurrido el 4 de abril del 2010 en la Sierra de Cucapah de 7.2 Mw. Basado en metodologías recientes, se pretende una explicación sobre el proceso de formación sísmica, específicamente utilizando imágenes de alta/media resolución espectral y espacial. Mediante estas imágenes se hace posible captar cambios en el sistema de lineamientos en sismos de alta magnitud. Entonces, se hace la conjetura de que los lineamientos son líneas que se presentan como el resultado de esfuerzos en una imagen, al aplicar una serie de filtros, y estos a su vez, representan cambios en el sistema de fallas previo a un sismo mayor a 5 M_w. El experimento consta de 5 imágenes de los sensores Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+ en diferentes fechas cercanas al evento. Dichas imágenes fueron analizadas con el software Adalgeo, encontrando rasgos significativos, donde los sismos analizados periódicamente dan muestras de su formación con una variación exponencial conforme a la cercanía de la fecha del evento analizado. Como resultado principal, se encuentra que el sistema de lineamientos es dinámico en el sentido de la falla con un alto nivel de correlación entre el tiempo y el dinamismo de la zona de estudio; aunado a esto, se demuestran que las correcciones aplicadas a las imágenes Landsat 7 EMT+ resultan ser indiferentes al algoritmo de extracción de lineamientos.

Palabras clave: lineamientos, sismos, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Adalgeo.

Doi: <http://10.18634/ugcj.23v.0i.763>

Recibido: 23/03/2017

Revisado: 02/05/2017

Aceptado: 10/12/2017

Correspondencia de autor:
r.romero11@info.uas.edu.mx

© 2016 Universidad La Gran Colombia. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution License, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que el autor original y la fuente se acrediten.

Cómo citar:

Romero-Andrade, R., Zazueta-Gambino, A., Beltrán-González, J.C., Uriarte-Adrián, J.J., Trejo-Soto, M.E., Vázquez-Becerra, E.G. (2017) Extracción de lineamientos originados por estrés sísmico a través de imágenes de alta resolución. *UGCiencia*, 23, 38-46.



Abstract

During the last decade, earthquakes of great intensity have been occurring in the world causing catastrophes on earth, without the possibility of being prevented. Specifically, in the case of Mexico, earthquakes ranging from low to high intensities, as it was the case of the one occurred on April 4, 2010, in the Sierra de Cucapah, 7.2 Mw. Based on recent methodologies, an explanation about the seismic formation process is intended, specifically using high/medium resolution spectral and spatial images. Through these images, it is possible to capture changes in the system of lineaments in high magnitude earthquakes. Then, it is conjectured that lineaments are lines that present as the result of efforts in an image, when applying a series of filters, and these in turn, represent changes in the fault system prior to an earthquake greater than 5 Mw. The experiment consists of 5 images of the Landsat 5 TM and Landsat 7 ETM+ sensors, during different times close to the event; these images were analyzed with the Adalgeo software. There were found significant features in which the analyzed earthquakes periodically give hints about their formation with an exponential variation according to the proximity of the date of the analyzed event. As a main result, it was found that the system of lineaments is dynamic in the sense of the fault, with a high level of correlation between the time and the dynamism of the study area; added to this, it is shown that the corrections applied to the Landsat 7 EMT + images turn out to be indifferent to the algorithm for extracting lineaments.

Keywords: Adalgeo, lineaments, earthquakes, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+.

Introducción

Actualmente, existen múltiples estudios sobre la detección anticipada de los sismos. Sin embargo, pocos de ellos se enfocan en la búsqueda de patrones mediante imágenes que permitan encontrar una asociación con la formación de sismos.

Algunos autores como: Bondur & Kuznetsova, 2005; Bondur & Kuznetsova, 2005; Arellano-Baeza, A., García V., & Trejo-Soto, E., 2006; Arellano-Baeza, A., Zverev, A. & Malinnikov, V. 2007; han encontrado que existe un patrón en cuanto a los lineamientos y la formación de un sismo de gran intensidad. Estos patrones, corresponden a fluidos que aumentan y salen a la superficie, incremento de gases y emanación de los mismos (principalmente CO₂), conductividad térmica, campos de temperatura y radiación electromagnética (Bondur & Kuznetsova, 2005).

Según Arellano-Baeza, A., Zverev, A., & Malinnikov, V, 2006; un lineamiento es una línea o una característica curva en una imagen, la cual, es posible detectar con un procesamiento especial en imágenes con una resolución espacial de 30 metros como Landsat ETM+ o TM (Abdullah & Abdoh Ghaleeb, 2013), basándose en un filtro detector direccional adaptado al problema (Soto-Pinto, Arellano-Baeza, & Sánchez, 2013), la transformada de Hough (VC, 1962) y el Algoritmo de Canny (Canny, 1986), específicamente sobre la banda

infrarrojo cercano (Abdullah & Abdoh Ghaleeb, 2013; Arellano-Baeza, Zverev, & Malinnikov, 2006; Šilhavý, Minár, Mentlík, & Sládek, 2016; Soto-Pinto et al., 2013). No obstante, se presentan otros tipos de lineamientos que no son producto de emisiones u originados por esfuerzos, tal es el caso de una carretera, ladera, línea de vegetación o un lineamiento geológico, entre otras (Arellano-Baeza, García, & Trejo-Soto, 2006; Šilhavý et al., 2016), Por otro lado, un lineamiento también es formado por una variedad de procesos geomorfológicos o geológicos como: ríos, valles, montañas y fracturas (Soto-Pinto et al., 2013), que pueden ser encontrados con la misma metodología.

Siguiendo este modelo, en una zona donde ha ocurrido un sismo $\leq 5M_w$, el proceso de formación se presenta en un estado inicial encontrándose una concentración de lineamientos; consecuentemente, deberá existir un incremento de lineamientos directamente proporcional al estrés generado por el sismo (Arellano-Baeza, García, et al., 2006; Arellano-Baeza, García, Trejo-Soto, & Bringas, 2009; Arellano-Baeza, Zverev, et al., 2006). Basándose en esta teoría, se representa la evolución del evento de Mayor Cucapah encontrando un patrón consistente con las siguientes aseveraciones: los lineamientos como producto de eventos sísmicos, no solo son encontrados físicamente (Bondur & Kuznetsova, 2005), su acumulación está directamente relacionada con el sentido de la falla (Bondur & Kuznetsova, 2005), estos aumentan con la proximidad

del evento y disminuyen cuando pasa el rompimiento (Arellano-Baeza, Garcia, et al., 2006; Arellano-Baeza, Zverev, et al., 2006; Arellano-Baeza et al., 2009; Soto-Pinto et al., 2013; Šilhavý et al., 2016).

Área de estudio

El área de estudio se sitúa en la zona norte de la península de Baja California en México, aproximadamente a 20 kilómetros al sur de la Ciudad de Mexicali, entre las latitudes $32^{\circ} 27' N$ y $32^{\circ} 15' N$; y longitudes $115^{\circ} 35' O$ y $115^{\circ} 19' O$, cubriendo aproximadamente 218 Km², donde se ubica, además, la Sierra de Cucapah (ver figura 1).

La península de Baja California se encuentra entre dos placas: Norte Americana y Pacífico; donde se observa que en la parte correspondiente a la placa del Pacífico, el deslizamiento se manifiesta en sentido Noroeste con respecto a la placa Norteamericana (NW); además en la zona Norte, el deslizamiento de estas dos placas se manifiesta en una zona de cizalla, que revela una microplaca flanqueada por fallas dextrales que son rotadas en sentido opuesto a las manecillas del reloj, por otro lado son gobernadas por el Sistema de Fallas de San Andrés de California, que originan sismos hasta de 7 M_w(Cruz-Castillo, 2002).

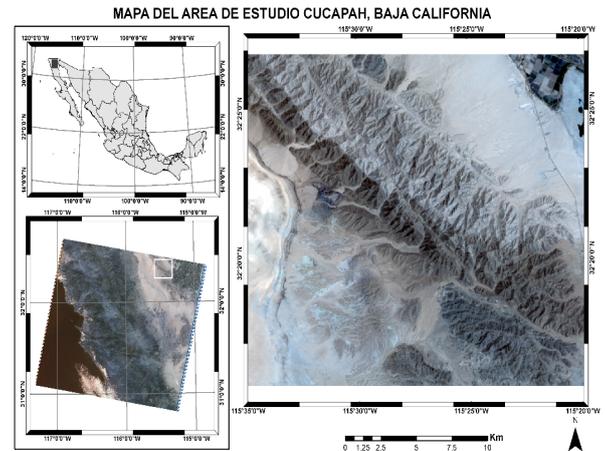
Esta zona al ser de mínima vegetación y actividad humana, permite visualizar propiedades del basamento rocoso que reflejan las dinámicas internas de la corteza, con un menor ruido, beneficiando al análisis mediante técnicas de teledetección.

Evento sísmico de 7.2 Mw en la Sierra de Cucapah

El sismo de Cucapah en escala 7.2 M_w, del 4 de abril del 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 de Cucapah. La zona de réplicas se distribuyó al sureste y noroeste del evento principal. Al noroeste los epicentros se traslaparon con el sistema de fallas de la laguna Salada, lo que representó una distancia de 120 K_m (Hauksson et al., 2011).

El proceso de ruptura según González-Ortega et al., 2014, fue complejo, donde además involucró un fallamiento normal del tipo lateral derecho, propagándose a lo largo de las fallas Pescadores y Borregos con la Sierra de Cucapah

Figura 1. Sierra de Cucapah con cobertura Landsat 5 TM.



Materiales

La experimentación se enfocó en el uso de imágenes multiespectrales de alta resolución: Landsat 5 TM (Chander & Markham, 2003), (Helder et al., 2008), y Landsat 7 ETM+ (Vogelmann et al., 2001), que cuentan con características similares; la diferencia radica en que Landsat 7 ETM+, añade la banda del pancromático con una resolución espacial de 15 metros.

En resumen, se utilizó un total de 10 imágenes de diferentes sensores con distintas fechas de adquisición (ver tabla 1 y 2), haciendo uso solamente de la banda 4, que corresponden a las regiones espectrales del infrarrojo cercano e infrarrojo medio.

Tabla 1. Escenas utilizadas del sensor Landsat 5 TM en la banda 4.

Archivo	Año	Día
LT50390382010031ED C00	2010	31
LT50390382010047ED C00	2010	47
LT50390382010079ED C00	2010	79
LT50390382010127ED C00	2010	127
LT50390382010191ED C00	2010	191

Tabla 2. Escenas utilizadas del sensor Landsat 7 ETM+, en la banda 4.

Archivo	Año	Día
LE07L1TP0390382010 0107	2010	7
LE07L1TP0390382010 0312	2010	71
LE07L1TP0390382010 0328	2010	87
LE07L1TP0390382010 0429	2010	119
LE07L1TP0390382010 0531	2010	151

Por otro lado, existen distintos software que pueden ser implementados en el análisis de las imágenes, como: PCI Geomatics (Geomatics, 1998), Lidens (Casas et al., 2000), Lessa (Zlatopolsky, 1997); sin embargo, solo Lessa está orientado a la prospección de lineamientos para el análisis de eventos sísmicos. No obstante, recientemente, se presentó el software Adalgeo (Soto-Pinto et al., 2013), orientado específicamente a este tipo de análisis, siendo además, de código libre. Por otra parte, para realizarlas correcciones correspondientes al bandeado de las imágenes Landsat 7, se utilizó el software ENVI 5.0 (Desai & Ganatra, 2012; Guide, 2008).

Materiales y métodos

Una vez seleccionada el área de estudio, se determinaron las imágenes aptas para el procesamiento, considerando características similares en cuanto a un porcentaje nulo de nubosidad; para este caso, se utilizaron imágenes con 0% de contenido en nubes. El proceso de extracción consta de 5 etapas fundamentales (ver figura 2): adquisición de imágenes, corrección por bandeado (Landsat 7 ETM+), recorte de la zona de interés, Adalgeo (normalización, extracción de trazos, consolidación de trazos, adelgazamiento de trazos y vinculación de trazos (Soto-Pinto et al., 2013), y representación de lineamientos.

Los parámetros de extracción de lineamientos usados en nuestra implementación son expuestos en la tabla 3, donde se observan los valores con el mejor resultado de esta experimentación para el caso particular de la zona de estudio.

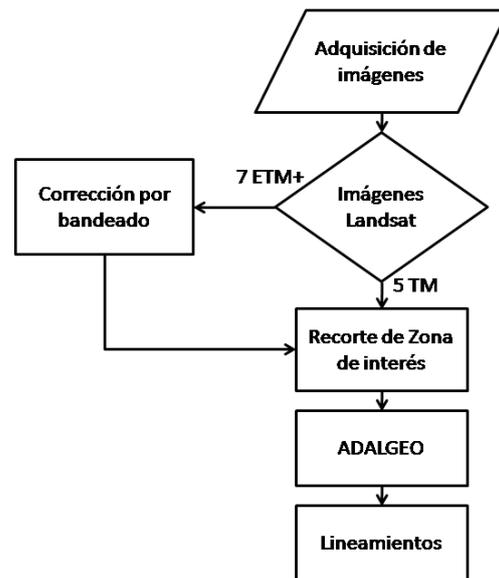
Tabla 3. Valores de configuración para la extracción de lineamientos

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Dirección	12	Umbral	14
Diámetro	25	Largo Mínimo	0.1
HoughPeaks	200	FillGap	5

Fuente: los autores

Al seleccionar las imágenes, se hicieron los recortes de la zona de interés, ya que, se requiere de la selección del lugar donde se presentó el sismo; realizando dicho proceso con el software ENVI 5.0. Finalmente, se dejó solamente la Sierra de Cucapah (ver figura 1).

Figura 2. Metodología para la extracción de lineamientos.



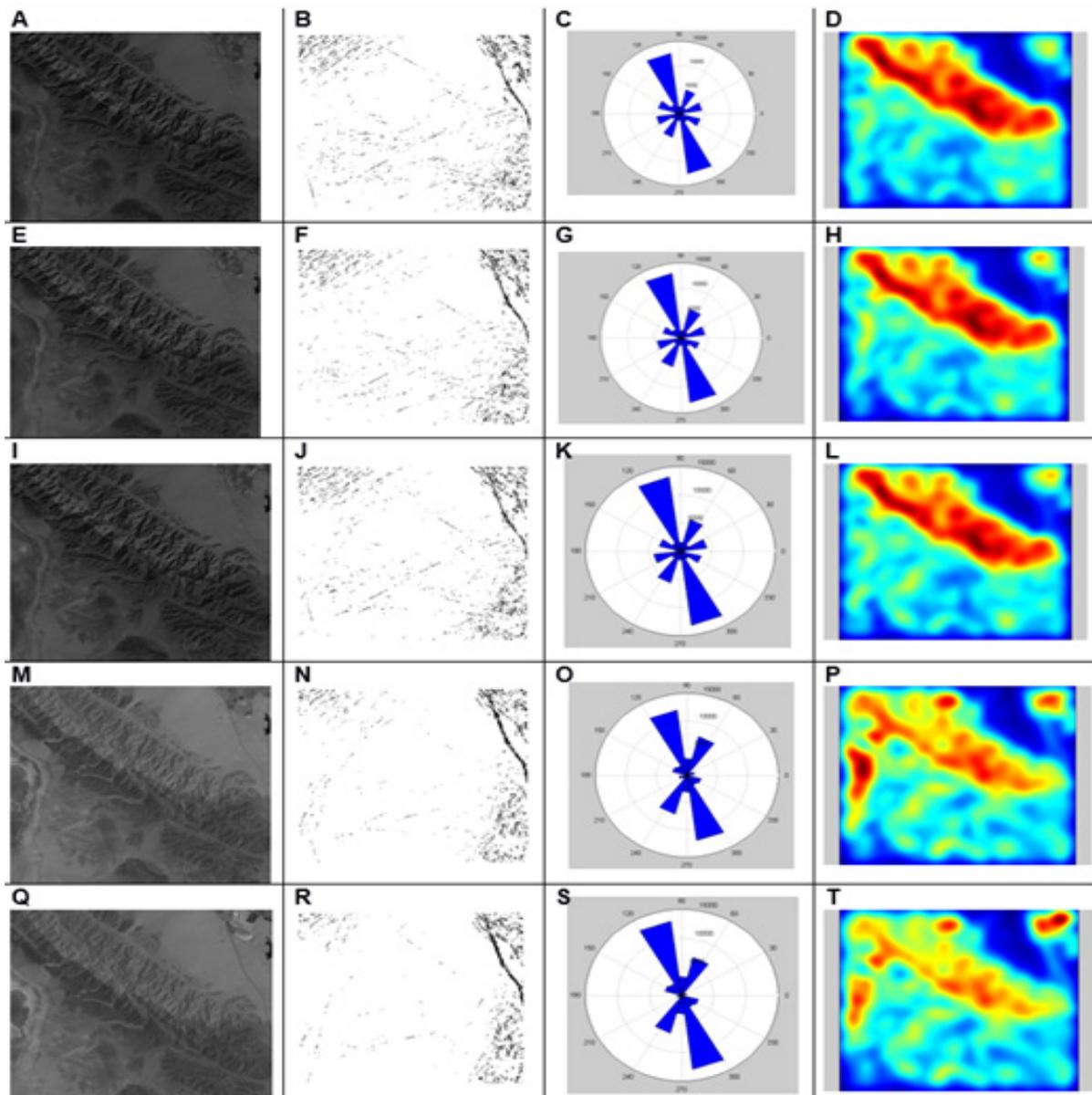
Fuente: los autores

Resultados

Para el estudio se realizaron múltiples experimentos con el objetivo de presentar la mejor respuesta en la extracción de lineamientos basándose en diferentes bandas espectrales; no obstante, se confirma que la banda 4 de Landsat 5 TM y 7 ETM+ en el infrarrojo

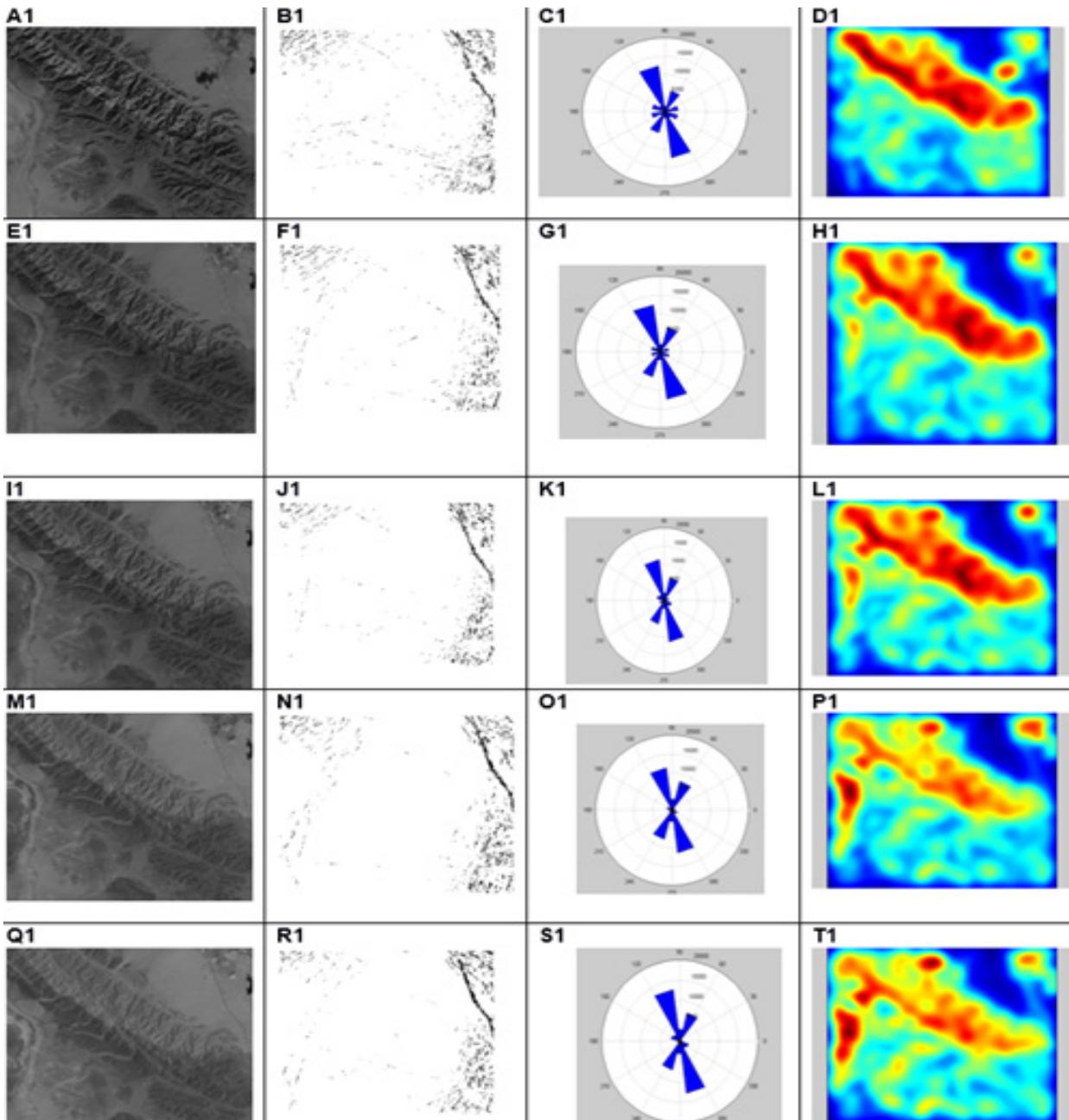
cercano, son óptimas para la extracción de lineamientos. A partir del proceso de extracción de lineamientos de las imágenes Landsat 5 TM, se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 3: La primera columna (A, E, I, M, Q): es la secuencia temporal de las imágenes Landsat 5, en las cercanías del epicentro presentado en la Sierra de Cuacapah el 4 de abril del 2010, (A) 31 de enero del 2010 (a 63 días del evento), (E) 16 de febrero del 2010 (a 47 días del evento), (I) 20 de marzo del 2010 (a 15 días del evento), (M) 7 de mayo del 2010 (a 33 días posterior del evento), (Q) 10 de julio del 2010 (a 97 días posterior del evento). La segunda columna (B, F, J, N, R): corresponde a los lineamientos resultantes. Tercera columna (C, G, K, O, S): es el diagrama de rosas, que representa la dirección de los lineamientos. Cuarta columna (D, H, L, P, T): corresponde a los campos de densidades con respecto a la concentración de lineamientos obtenidos. Fuente:



Fuente: los autores

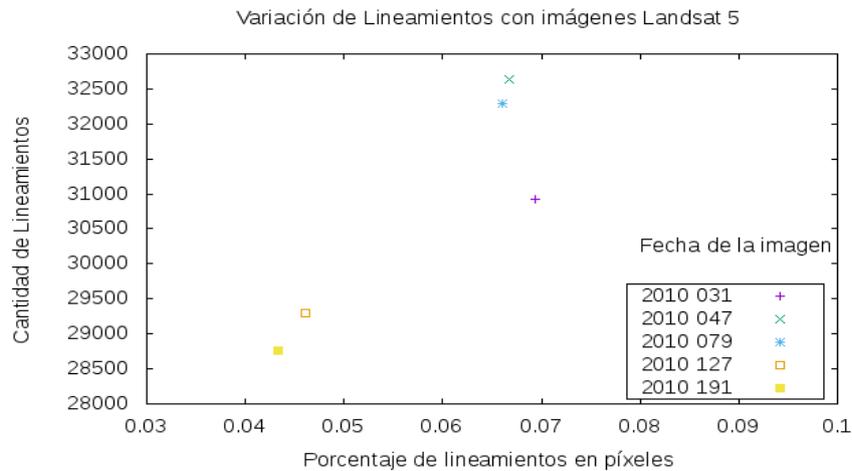
Figura 4: La columna (A1, E1, I1, M1, Q1): es la secuencia temporal de las imágenes Landsat 7 ETM+, en las cercanías del epicentro presentado en la Sierra de Cuacapah el 4 de abril del 2010, (A1) 07 de enero del 2010 (87 días del evento), (E1) 12 de marzo del 2010 (23 días del evento), (I1) 28 de marzo del 2010 (a 7 días del evento), (M1) 29 de abril del 2010 (25 días posterior del evento), (Q1) 31 de mayo del 2010 (57 días posterior del evento). La columna (B1, F1, J1, N1, R1): representa a los lineamientos obtenidos. Tercera columna (C1, G1, K1, O1, S1): diagrama de rosas, que representa la dirección de los lineamientos. La cuarta columna (D1, H1, L1, P1, T1): corresponde a los campos de densidades con respecto a la concentración de lineamientos resultantes.



Fuente: los autores

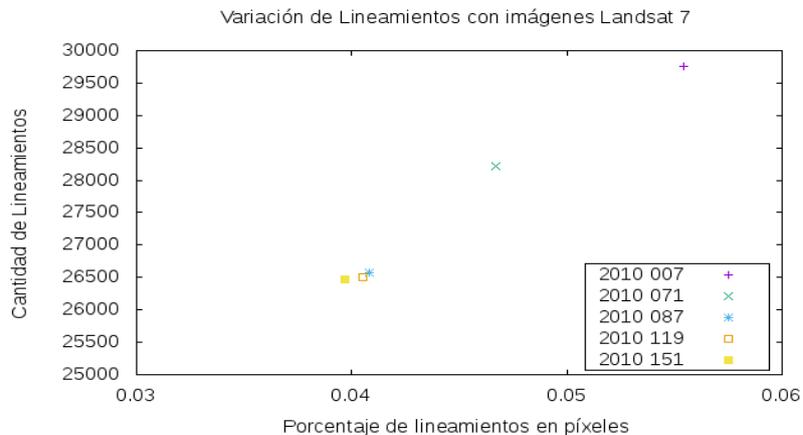
Los resultados presentados en la figura 3, demuestran que existe una variabilidad o incremento de los lineamientos originados por esfuerzos debido a la formación de un sismo de gran intensidad (Figura 3: B, F, J, N, R), estos se encuentran orientados en el sentido predominante con el sistema de fallas (Figura 3: C, G, K, O, S). Con base a la disminución de los lineamientos (Figura 3: N), se observa que, al pasar el sismo, existe una liberación de energía visible en la concentración de los lineamientos encontrados. Esto se puede demostrar estadísticamente al realizar un conteo de los lineamientos extraídos en las imágenes procesadas. En la Figura 5, se puede notar que días antes al evento sísmico se presenta un aumento considerable en la cantidad de lineamientos, no obstante, en la medida que pasa el evento, existe una disminución de los mismos.

Figura 5. Variación de lineamientos con imágenes Landsat 5 TM.



En el mismo sentido del análisis, sobre la figura 6, se observa la variación de lineamientos con imágenes Landsat 7 ETM+.

Figura 6. Variación de lineamientos con imágenes del sensor Landsat 7 ETM+.



Fuente: los autores

Las soluciones obtenidas presentan una clara inestabilidad en la gestión sísmica cuando se acumula tensión en un posible sismo. Por su parte, al analizar ambas gráficas de forma numérica, es posible notar que existe una mayor sensibilidad al realizar el estudio con imágenes del sensor Landsat 5 TM, ya que presenta valores extremos notables en su comportamiento, es decir, en cuanto a la cantidad de líneas extraídas sobre la escena.

Discusión de resultados

El algoritmo presentado es sensible a los parámetros de ajuste del software para la extracción de lineamientos; no obstante, este estrés encontrado durante la formación de un evento sísmico es significativo para entender desde otro punto de vista la gestión sísmica. Por otro lado, sigue siendo una interrogante el conocer la presencia de este estrés en las imágenes en sentido perpendicular a los epicentros presentados.

Conclusiones

Evidentemente, existe un incremento de tensión durante la gestión sísmica, y esta a su vez, es posible captarla mediante imágenes satelitales; aunado a ello, es posible aplicar técnicas de procesamiento digital de imágenes que permitan extraer las características que den indicio de la acumulación de tensión.

La calidad de las imágenes determinará el grado de precisión para la extracción de los lineamientos originados por tensión sísmica. El estudio realizado estuvo influenciado en gran medida por la calidad de las imágenes, es por ello, que se buscó obtener las mejores imágenes disponibles en los sensores de libre acceso.

Agradecimientos

Agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo prestado y el financiamiento. A la Universidad de Santiago de Chile, particularmente al Dr. Arellano Baeza por la herramienta prestada para realizar la experimentación y por sus consejos. Al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), por ofrecer de manera gratuita las imágenes para realizar la experimentación.

Referencias bibliográficas

- Arellano-Baeza, A., García, R., & Trejo-Soto, M. (2006). Use of high resolution satellite images for tracking of changes in the lineament structure, caused by earthquakes, situated nearly the Pacific coast of the North and South America. Paper presented at the 36th Cospar Scientific Assembly.
- Addin en Reflistx Abdullah, S. N., & Abdoh Ghaleeb, A. (2013). Landsat ETM-7 for lineament mapping using automatic extraction technique in the SW part of Taiz Area, Yemen. *Global Journal of Human-Social Science Research*, 13(3).
- Arellano-Baeza, A., Garcia, R., & Trejo-Soto, M. (2006). *Use of high resolution satellite images for tracking of changes in the lineament structure, caused by earthquakes, situated nearly the Pacific coast of the North and South America.* Paper presented at the 36th COSPAR Scientific Assembly.
- Arellano-Baeza, A., García, R., Trejo-Soto, M., & Bringas, A. M. (2009). Use of the ASTER satellite images for evaluation of structural changes in the Popocatepetl volcano related to microseismicity. *Advances in Space Research*, 43(2), 224-230.
- Arellano-Baeza, A., Zverev, A., & Malinnikov, V. (2006). Study of changes in the lineament structure, caused by earthquakes in South America by applying the lineament analysis to the Aster (Terra) satellite data. *Advances in Space Research*, 37(4), 690-697.
- Bondur, V., & Kuznetsova, L. (2005). *Satellite monitoring of seismic hazard area geodynamics using the method of lineament analysis.* Paper presented at the Proc. of.
- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*(6), 679-698.
- Casas, A. M., Cortes, A. L., Maestro, A., Soriano, M. A., Riaguas, A., & Bernal, J. (2000). Lindens: a program for lineament length and density analysis. *Computers & Geosciences*, 26(9), 1011-1022.

- Cruz-Castillo, M. (2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México. *GEOS, Unión geofísica mexicana*, 22, 37-42.
- Chander, G., & Markham, B. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 41(11), 2674-2677.
- Desai, M., & Ganatra, A. (2012). Survey on gap filling in satellite images and inpainting algorithm. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 4(3), 341.
- Geomatics, P. (1998). Using PCI software. *PCI Geomatics, Ontario*.
- González-Ortega, A., Fialko, Y., Sandwell, D., Alejandro Nava-Pichardo, F., Fletcher, J., Gonzalez-García, J., . . . Funning, G. (2014). El Mayor-Cucapah (Mw 7.2) earthquake: Early near-field postseismic deformation from InSAR and GPS observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(2), 1482-1497.
- Guide, E. U. s. (2008). ENVI on-line software user's manual. *ITT Visual Information Solutions*.
- Hauksson, E., Stock, J., Hutton, K., Yang, W., Vidal-Villegas, J. A., & Kanamori, H. (2011). 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 and Applied Geophysics*, 168(8-9), 1255-1277.
- Helder, D. L., Markham, B. L., Thome, K. J., Barsi, J. A., Chander, G., & Malla, R. (2008). Updated radiometric calibration for the Landsat-5 Thematic Mapper reflective bands. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(10), 3309-3325.
- Šilhavý, J., Minár, J., Mentlík, P., & Sládek, J. (2016). A new artefacts resistant method for automatic lineament extraction using Multi-Hillshade Hierarchic Clustering (MHHC). *Computers & Geosciences*, 92, 9-20.
- Soto-Pinto, C., Arellano-Baeza, A., & Sánchez, G. (2013). A new code for automatic detection and analysis of the lineament patterns for geophysical and geological purposes (Adalgeo). *Computers & Geosciences*, 57, 93-103.
- VC, H. P. (1962). Method and means for recognizing complex patterns: Google Patents.
- Vogelmann, J. E., Helder, D., Morfitt, R., Choate, M. J., Merchant, J. W., & Bulley, H. (2001). Effects of Landsat 5 Thematic Mapper and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus radiometric and geometric calibrations and corrections on landscape characterization. *Remote sensing of environment*, 78(1), 55-70.
- Zlatopolsky, A. A. (1997). Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA. *Computers & Geosciences*, 23(1), 45-62.