

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Fluctuaciones Glaciares (1985 - 2010) en Tres Volcanes de México,

Usando Imágenes Landsat

Por:

LIBRADO SOSA DÍAZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Fluctuaciones Glaciares (1985 - 2010) en Tres Volcanes de México,
Usando Imágenes Landsat

Por:

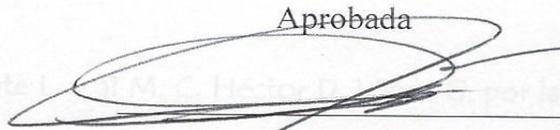
LIBRADO SOSA DÍAZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

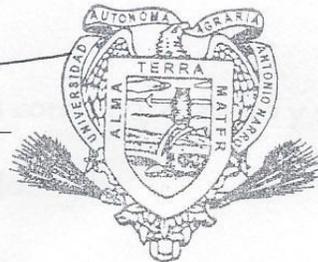
INGENIERO FORESTAL

Aprobada



Dr. Jorge Méndez González

Asesor Principal

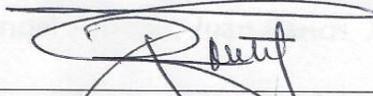


DEPARTAMENTO FORESTAL



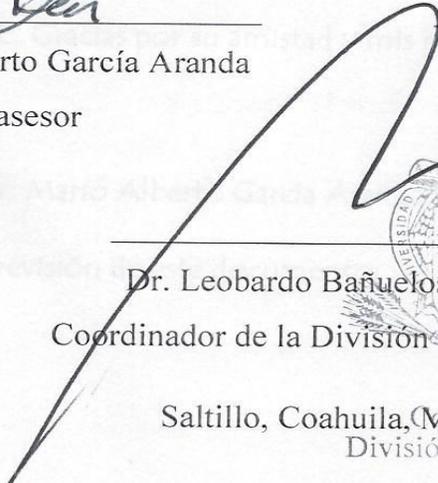
Dr. Mario Alberto García Aranda

Coasesor



Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho

Coasesor



Dr. Leobardo Bañuelos Herrera

Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

División de Agronomía

Junio de 2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme la fuerza, inteligencia, sabiduría, entendimiento, fe, y sobre todo por permitirme estar y lograr lo que hasta ahora soy. Cuídate siempre.

A mi Alma Mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, que me cobijó y me formó durante cinco valiosos años, inculcándome cuanto conocimiento quise aprender.

Al Dr. Jorge Méndez González, gran profesor y amigo, por el apoyo, la amistad, los consejos y sobre todo, la confianza que me ha brindado. Dr. Jorge, Doña Pao: Gracias, por ser parte importante del motor que ha hecho posible este logro y sobre todo por su amistad, que han sido de gran ayuda durante mi formación profesional.

Al Dr. Alejandro Zárate L. y al M. C. Héctor D. López G, por la confianza, el apoyo y sobre todo por los consejos que como profesores y amigos me han ofrecido.

A mis mejores amigos y compañeros: Octavio José, Manuel Alfredo, Juan Carlos, José Antonio E., Cecilia G. Claudia E. Gracias por su amistad y mis mejores deseos todos ustedes.

A mis coasesores el Dr. Mario Alberto García Aranda y el Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho por el tiempo dedicado a la revisión de este documento.

DEDICATORIA

*A mis padres **Líbrado Sosa Ortiz** y **Leticia Díaz Solís**; Por darme la vida, inculcarme los valores que ahora poseo, lecciones, consejos y por todo su cariño y amor; que han sido la base fundamental para culminar una etapa más. Agradezco infinitamente por darme la oportunidad de ser quien soy y por el apoyo incondicional que me brindan. Los Amo.*

*A mis hermanos **Humberto**, **E. Octavio**, **R. Misael**, **Leticia**, **A. Baruk** y **Carol**; a quienes está dedicado este esfuerzo, para que les sirva de ejemplo y puedan fijarse a sí mismos metas y logros mayores.*

*A mi novia **Gladys Selene R. R.**, por su compañía, cariño y apoyo siempre incondicional.*

A todos aquellos que han creído en mí y me han ayudado ser una mejor persona; A todos mis familiares, maestros del Departamento Forestal (UAAAN) y a mis amigos Ing. Javier J., Ing. Alejo L., Ing. Abel M., Ing. Nelly A. e Ing. Ciro R. por sus consejos y confianza.

ÍNDICE

RESUMEN	i
I. INTRODUCCIÓN	ii
Objetivos.....	iv
Hipótesis.....	v
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	1
El cambio climático	1
Relación clima – el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur.....	1
Glaciares	2
Tratamiento de datos multiespectrales	3
Corrección de imágenes	3
Clasificación supervisada y no supervisada	5
Mapeo glaciar	6
III. MATERIALES Y MÉTODOS	8
Área de estudio.....	8
Obtención de imágenes satelitales.....	9
Corrección de imágenes	9
Identificación de glaciares	10
Relación de glaciares entre volcanes estudiados	10

Tendencia de superficie de glaciares y detección de cambios	11
Relación del ENSO y los glaciares.....	11
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
Corrección radiométrica de imágenes satelitales	13
Superficie glaciar de los volcanes estudiados	15
Estimación de superficie glaciar entre volcanes estudiados.....	23
Tendencias de superficie glaciar de los volcanes analizados	26
Cambio de régimen en la superficie glaciar	27
El ENSO y la dinámica de los glaciares estudiados	29
Reconstrucción del perfil glaciar a partir de MEI	33
V. CONCLUSIONES	37
VI. REFERENCIAS	38
VII. ANEXOS.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Resultados de la corrección atmosférica por el método de valor mínimo (Chuvieco, 1996); A) volcán Popocatépetl e Iztaccíhuatl (Path = 26, Row = 47, tomada el 16 marzo de 1986); B) volcán Pico de Orizaba (Path = 25, Row = 47, tomada el 23 de marzo de 1986); 1) escena antes de la corrección y 2) escena posterior a la corrección. 13
- Figura 2.** Resultados de la corrección atmosférica y de la conversión de unidades; A) Histograma de la imagen antes de la corrección atmosférica y a) Histograma posterior a la corrección atmosférica (escena Path = 26, Row = 47; tomada el 16 de marzo de 1986); B) valor del pixel antes de la conversión de radiación espectral a reflectancia TOA y b) valor del pixel posterior a la conversión. 14
- Figura 3.** Comparación de dos diferentes métodos de mapeo glaciar: línea amarilla relación de bandas (TM4/TM5); línea blanca, clasificación no supervisada. En el volcán: A) Iztaccíhuatl, B) Pico de Orizaba y C) Popocatépetl. Escenas Landsat TM de 1986 en falso color RGB (Rojo = banda 5, Verde = banda 4 y Azul = banda 1)..... 17
- Figura 4.** Errores en la identificación de glaciar en el método relación de bandas (TM4/TM5). Se muestran los pixeles mal asignados en color azul y en color turquesa los correctamente asignados como nieve glaciar. A) Iztaccíhuatl, escena del 2 de febrero de 2009; B) Popocatépetl, escena del 4 de febrero de 1998 y C) Popocatépetl tomada en misma fecha que A. 17
- Figura 5.** Fluctuaciones en la superficie glaciar del volcán A) Popocatépetl (escala 1:50,000); B) Iztaccíhuatl (escala 1:70,000) y C) Pico de Orizaba (escala 1:50,000); en los años 1) 1986; 2) 1994; 3) 1998 y 4) 2009; ubicados en la Faja Volcánica Transmexicana. 22

Figura 6. Delineación de la fluctuación glaciár en el volcán: A) Popocatépetl, B) Iztaccíhuatl (año 2010 para ambos) y C) Pico de Orizaba (año1992). Fluctuación glaciár: año 1986 (rojo); año 1994 (verde); año 1998 (rosa) y año 2009 (amarillo); Composición en falso color de escenas (Rojo = banda 5; Verde = banda 4; Azul = banda1).....23

Figura 7. Regresión lineal simple entre las superficie glaciár del volcán Popocatépetl e Iztaccíhuatl (A) Pico de Orizaba versus Popocatépetl (B).25

Figura 8. Método Rodionov para la detección de cambios de régimen en la superficie glaciár de las series de tiempo evaluadas para los volcanes A) Popocatépetl, B) Iztaccíhuatl y C) Pico de Orizaba; 1) cuando se incluye el valor extremo y 2) cuando se excluye.28

Figura 9. Regresión lineal simple entre la superficie glaciár del volcán A) Popocatépetl, B) Iztaccíhuatl y C) Pico de Orizaba y los valores bimestrales del MEI, Mayúsculas = tomando en cuenta el valor extremo y Minúsculas = excluyendo el valor extremo; 1 = Gráfico de la regresión lineal simple y 2 = Reconstrucción del perfil glaciár a partir de la ecuación generada en 1.36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de superficie glaciaria de 4 escenas para el volcán Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba, ubicados en la Faja Volcánica Transmexicana, obtenidas mediante dos diferentes métodos de mapeo.	16
Tabla 2. Estadísticos Kappa para la evaluación de calidad del método de clasificación no supervisada, realizada en 4 escenas para los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba.	18
Tabla 3. Superficie glaciaria identificada en el volcán Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba de 1985 a 2010, mediante la técnica de clasificación no supervisada de datos Landsat TM y ETM+.	19
Tabla 4. Resumen del análisis de correlación lineal entre la superficie glaciaria de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba de México.	24
Tabla 5. Estadísticos básicos de las ecuaciones de regresión para la estimación de la nieve glaciaria entre el volcán Popocatepetl e Iztaccíhuatl (P_c vs I_c) y Pico de Orizaba y Popocatepetl (P_O vs P_c).	25
Tabla 6. Resultados del análisis de tendencia de superficie glaciaria mediante la prueba Mann-Kendall para los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba de México, incluyendo y excluyendo el valor extremo de cada volcán.	26
Tabla 7. Resumen del análisis de correlación de Pearson realizada entre superficie glaciaria de tres volcanes más altos de la Faja Volcánica Transmexicana y los valores bimestrales del MEI ($17 < n > 21$).	30

Tabla 8. Estadísticos básicos del análisis de regresión lineal entre la superficie glaciaria de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba y el valor bimestral del MEI de mayor correlación.34

Anexo1. Resumen de imágenes multiespectrales utilizadas para la identificación glaciaria en los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba ubicados en el centro y occidente de la Faja Volcánica Transmexicana.46

Correo Electrónico; Librado Sosa díaz, librado.24@hotmail.com

RESUMEN

Se ha evidenciado que debido al incremento global de la temperatura, las superficies de varios glaciares del mundo se están contrayendo. El presente trabajo se realizó con el propósito de evaluar la fluctuación glaciaria (1985 - 2010) de tres volcanes localizados en el centro sur de México: Popocatepetl (*Pc*), Iztaccíhuatl (*Ic*) y Pico de Orizaba (*PO*), ubicados entre 19° y 20° de latitud Norte dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT). Para evaluar la fluctuación del glaciar, se obtuvieron imágenes Landsat TM o ETM+ de cada año, a las cuales se les hicieron correcciones atmosféricas y radiométricas. Se probaron dos métodos de identificación glaciaria sugeridos en la literatura, de acuerdo a los resultados se eligió el mejor método y se calcularon superficies anuales de los glaciares. Para evaluar la tendencia de la superficie de los glaciares, se utilizó la prueba no paramétrica Mann-Kendall. Las superficies anuales de los glaciares se correlacionaron con el Índice Multivariado del ENSO, y en base a esto, se reconstruyeron superficies históricas de los glaciares de los tres volcanes. Los resultados indican que durante el periodo de estudio la superficie promedio es de 263.83 ± 703.4 , 428.96 ± 951.6 y 329.26 ± 643.7 hectáreas, para *Pc*, *Ic* y *PO* respectivamente. Existe una alta correlación entre superficies de glaciares de *Pc* e *Ic* ($r = 0.6749$ y $p = 0.9773$) y entre *PO* y *Pc* ($r = -0.6543$ y $p = 0.9711$). Únicamente el glaciar de *PO* sufre una disminución de 6.10 ha por año. Se observa que las fluctuaciones de los glaciares estudiados son gobernadas parcialmente por el fenómeno del ENSO en su fase cálida (El Niño). La reconstrucción de superficies de glaciares (1950 - 2010) muestra una tendencia similar a la del presente.

Palabras Clave: Glaciares, México, ENSO, Landsat.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático nos enfrenta a nuevos retos y desafíos que ponen en riesgo nuestro futuro desarrollo y es el problema más grande que va a enfrentar la humanidad en los próximos años (Álvarez, 2010). En este sentido, Méndez *et al.*, (2007) afirman que se ha acumulado enorme evidencia de que el clima en México exhibe fluctuaciones distintas a las registradas años atrás. Las emisiones de gases efecto invernadero en México para el 2002 fueron de 553 millones de Toneladas (SEMARNAT, 2009). El Cambio climático puede originar serios impactos a ecosistemas vulnerables (IPCC, 2002). Al respecto, Raynal-Villaseñor (2010) menciona que, mayores tasas de evapotranspiración, bajas precipitaciones, migración de plagas hacia latitudes más altas y el incremento de los incendios forestales, son algunas de las consecuencias para los recursos naturales a causa del cambio climático. Por su parte, Rivera *et al.*, (2000) mencionan que el aumento del nivel del mar generado por la fusión de los glaciares de montaña, es otra consecuencia importante de la variación climática.

Al reducirse la Criósfera, el albedo global disminuye, de modo que se absorbe más energía a nivel de la superficie terrestre y, consecuentemente, la temperatura se eleva (CAN, 2007). Los glaciares de montaña interactúan sensiblemente con el clima y por lo tanto son buenos indicadores de su estado (Oerlemans, 1994), y los glaciares de México poseen un interés inusitado puesto que son los únicos en la latitud 19° Norte (Delgado, 2008).

Se han realizado algunos estudios sobre la fluctuación glaciaria en diversas partes del mundo, por ejemplo, en los valles del Norte de Tien Shan, hubo una pérdida de más del 32 % de superficie glaciaria entre 1955 y 1999 (Bolch, 2006); para el mismo sitio (Tien Shan, Asia Central), los glaciares de montaña, no presentaron ningún cambio durante 2000-2007,

contrariamente, 7 de 306 glaciares evaluados en ese sitio presentaron avances de hasta 1,400 m (Narama *et al.*, 2009). En los Himalayas la superficie de 466 glaciares se redujo de 2077 km² en 1962 a 1628 km² en 2007, lo que equivale a una pérdida de 21 % (Kulkarni *et al.*, 2007). Los glaciares Leconte, South Sawyer, Dawes y Muir (Sureste de Alaska) han presentado un adelgazamiento de hasta 640 m en sus lenguas terminales y de 100 m en sus elevaciones más altas (Larsen *et al.*, 2007). El glaciar Cipresses en la región central de Chile presentó un retroceso de 11 m año⁻¹ entre los años 1888 y 1955, 27 m año⁻¹ entre 1955 y 1968 y de 30 m año⁻¹ entre 1968 y 1997 (Rivera *et al.*, 2000). El glaciar Tyndall, en el Sur de la Patagonia Chilena, presentó un adelgazamiento de 4.24 m en la zona marginal y de 2.4 m en el centro del glaciar, del 2003 a 2004 (Araos *et al.*, 2007).

En general para Chile, Rivera *et al.*, (2000), encontraron que, de una muestra de 100 glaciares, el 87 % mostró retroceso, 7% no presentaron cambios y solo el 6 % manifestó un leve avance, la muestra representa el 6.5 % de los glaciares de ese país (Larraín, 2007). La mayoría de los estudios atribuyen las fluctuaciones glaciares al cambio climático, sin embargo, existen otras causas que influyen en la dinámica de los glaciares. En México Miranda *et al.*, (2007) describen la influencia de la actividad eruptiva del Popocatepetl con el retroceso y el surgimiento de sus glaciares. Por su parte Larsen *et al.*, (2007) mencionan que la retirada del hielo de más de 1 km año⁻¹ en el sureste de Alaska y el noroeste de la Columbia Británica, es debido a la dinámica natural de los glaciares de marea y no directamente obligada al cambio climático.

Un problema en el monitoreo de los glaciares de montaña es el abrupto entorno en el que se encuentran ubicados. En este sentido, la teledetección constituye el único camino para monitorear el estado de los glaciares. El programa Landsat ofrece el registro mundial

continuo más largo de la superficie de la Tierra, con imágenes científicamente valiosas del entorno de nuestro planeta (NASA). En este trabajo se usaron datos Landsat TM y ETM+, para conocer las fluctuación glaciaria del Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba, entre los años 1985 a 2010 y su relación con el fenómeno del ENSO, y evidenciar, sí en efecto existe una retirada generalizada en los glaciares montañosos fuera de las regiones polares (IPCC, 2002), específicamente en los glaciares de México. En este sentido, existe poca información, lo que hace necesario realizar investigaciones tanto de alteración de patrones de lluvia como del estado y fluctuaciones de los glaciares, que al mismo constituyen una importante reserva de agua dulce, para las ciudades cercanas a ellos (SEMARNAT, 2013).

Objetivos

General

Evaluar los cambios que ha sufrido la superficie glaciaria en los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba en los últimos 20 años mediante el uso de imágenes de Satélite Landsat.

Específicos

- ❖ Evaluar las fluctuaciones de los glaciares de montaña en los últimos 25 años de los volcanes Popocatepetl (*Pc*) Iztaccíhuatl (*Ic*) y Pico de Orizaba (*PO*), ubicados en el centro sur de México.

- ❖ Determinar si existen cambios (aumento/decremento) o cambio de régimen de la superficie glaciaria en los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba, en los últimos 25 años.
- ❖ Determinar la relación existente entre la superficie glaciaria histórica de los glaciares Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba, con el fenómeno del ENSO.

Hipótesis

H₀: No existe decremento glaciario en los tres volcanes más altos de México (*Pc, Ic y PO*) durante el periodo de 1985 - 2010.

H_a: Existe decremento glaciario durante el periodo de 1985 - 2010 en al menos uno de los tres volcanes más altos de México.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

El cambio climático

El cambio climático se define como todo cambio que ocurre en el clima a través del tiempo resultado de la variabilidad natural o de las actividades humanas (Álvarez, 2010). Por ello se ha observado un aumento del promedio mundial de las temperaturas del aire y del océano, de la fusión de nieves y hielos y del aumento del promedio mundial del nivel del mar (IPCC, 2008). El calentamiento global, por su parte, es la manifestación más evidente del cambio climático (Álvarez, 2010). Por lo tanto, para evidenciar la existencia de un cambio climático, es necesario analizar las tendencias de variables climáticas, considerando diferentes escalas de tiempo y espacio (Méndez *et al.*, 2007).

Relación clima – el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur

Un evento de interacción océano-atmósfera, que se desarrolla en el Pacífico Ecuatorial a escala interanual, se conoce con el nombre de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS, en español/ENSO, en inglés), o comúnmente, con el nombre de El Niño (Maturana *et al.*, (2004), Capel, 1999). Mientras sus impactos se manifiestan en los Trópicos, en latitudes templadas y frías (zona Extratropical) son más variables debido a que la circulación atmosférica en estas regiones puede anular la influencia de este fenómeno (Capel, 1999).

Algunos de los índices que se han usado para cuantificar las variaciones de El Niño son El Oceanic Niño Index (ONI) y el Multivariate ENSO Index (MEI) (Paolini *et al.*, 2004). El índice MEI es una medida multivariada del ENSO, que expresa la interacción de seis variables observadas sobre el Pacífico Tropical, que son: presión a nivel del mar (P),

componentes del viento zonal (U) y meridional (UV), temperatura superficial del mar (S), temperatura del aire en la superficie de la tierra (A) y nubosidad (C) (Wolter y Timlin, 1998). Los valores positivos/negativos del MEI representan la fase caliente/fría o El Niño/La Niña (Hernández *et al.*, 2004).

Glaciares

Los glaciares son masas formadas por la acumulación prolongada de nieve y su transformación en hielo, estas masas se deforman y se desplazan lentamente por efecto de la gravedad o simplemente por su propio peso (Martínez *et al.*, 2004). Conjuntamente su magnitud es tal, que constituyen el mayor reservorio de agua dulce en el planeta (SEMARNAT, 2009).

El grupo de expertos en cambio climático (IPCC, 2002) mencionan que la extensión de la cubierta de hielo ha disminuido cerca de un 10 % en el hemisferio Norte desde finales de la década de los 1960. Francou *et al.*, 2004, mencionan que los períodos de El Niño se caracterizan por el aumento de las tasas de fusión de los glaciares. Además, Dyurgerov y Meier (2005) afirman que las variaciones glaciares tienen un impacto directo en los procesos de orden mundial, como la subida del nivel del mar, la alimentación de los ríos de montaña, el balance de agua dulce de los océanos, los desastres naturales, e incluso la forma y la rotación de la tierra. Además, al igual que los sedimentos de mares y lagos, las capas de hielo contienen evidencia detallada de las fluctuaciones ambientales, en muchos casos con una precisión anual para los últimos siglos (Martínez *et al.*, 2004).

Tratamiento de datos multiespectrales

Las técnicas de tratamiento de datos en Teledetección tienen como objetivo esencial ayudar al investigador en la interpretación de los datos procedentes de sensores remotos (Sacristán, 2007). Un adecuado tratamiento de una imagen permite obtener detalles de la misma que aparecen ocultas a la simple observación visual (Casanova, 1992). El procesamiento digital de imágenes implica alguna de cuatro operaciones básicas: restauración, mejoramiento, clasificación y transformación de imágenes (Eastman, 2004).

Por otra parte Rodríguez y Arredondo, (2005) mencionan que la obtención de imágenes de áreas inaccesibles, visión panorámica, homogeneidad en la toma de datos, información de regiones no visibles del espectro (infrarrojo medio, térmico y microondas), almacenamiento digital y reducción de tiempo y costos de inversión, son algunas de las ventajas del uso de teledetección. La percepción remota o teledetección permite llevar a cabo la evaluación de los recursos naturales y sus problemas en casi tiempo real y con eficacia, pudiendo realizar monitoreos continuos (Rivera *et al.*, 2002). De hecho, casi un 9% de los artículos publicados en los últimos cinco años en revistas de ecología de alto impacto hacen uso de la percepción remota (Cabello y Paruelo, 2008). En particular, las imágenes de satélite Landsat TM han sido utilizadas en diversas áreas de la investigación, como el uso del suelo, agricultura, recursos forestales, geología, mapeo glaciario, calidad del agua, contaminación, entre otros (Rivera *et al.*, 2002).

Corrección de imágenes

La capacidad para detectar y cuantificar los cambios en el medio ambiente depende de que los sensores puedan proporcionar datos correctos y consistentes, de las características de la

superficie de la Tierra a través del tiempo (Chander *et al.*, 2009). Las principales fuentes de errores radiométricos en las imágenes digitales provienen de la calibración de los detectores que convierten la radiancia recibida en valores digitales y los efectos atmosféricos (Chuvienco, 1995; Brizuela *et al.*, 2007). Los efectos de la dispersión y absorción de la radiación a causa de la atmósfera disminuyen el contraste de las imágenes y por lo tanto la calidad de la información (Lira, 2010). Al respecto Eastman (2004) menciona que para muchas aplicaciones en teledetección, como la clasificación no supervisada de una imagen, no es necesario hacer ninguna conversión a los números digitales de la imagen. Por el contrario, Lira, (2010) menciona que al realizar un análisis e interpretación cuantitativa en la que se requiere de valores absolutos de los píxeles, las correcciones atmosféricas son necesarias; en el mismo sentido Chuvienco, (1995) también afirma que cuando se realizan análisis multitemporales, es necesario hacer correcciones atmosféricas, puesto que el efecto que causa la atmósfera no es comparable a la que experimenta otra imagen en distinta fecha.

En Chander y Markham (2003) y Chander *et al.*, 2009 se muestran las ecuaciones y valores de escala para realizar la conversión de radiancia espectral a reflectancia TOA o superior de la atmósfera (Top-Of-Atmosphere reflectance) para imágenes de los sensores Landsat TM, ETM+, MSS y EO-1 ALI. Los mismos autores mencionan algunas ventajas en utilizar TOA reflectancia en lugar de radiancia espectral: 1) se elimina el efecto del coseno de diferentes ángulos cenitales solares debido a la diferencia de tiempo entre adquisiciones de las imágenes; 2) se compensa para diferentes valores de la irradiancia solar extra-atmosférica (irradiancia solar media de la atmosférica) que surge de las diferencias entre

bandas espectrales y 3) se corrige la variación para la distancia Tierra-Sol entre las diferentes fechas de adquisición.

Clasificación supervisada y no supervisada

La clasificación de imágenes se refiere a la interpretación asistida por computadora de imágenes de sensores remotos (Eastman, 2004). En una clasificación espectral se parte del supuesto de que objetos diferentes están caracterizados por respuestas espectrales diferentes y que una clase de objetos tiene asociada una respuesta promedio llamada firma espectral (Lira, 2010; Sacristán, 2007). Al respecto Rodríguez y Arredondo (2005) mencionan que algunos factores como el ángulo de iluminación solar, modificaciones que el relieve introduce en el ángulo de iluminación por pendientes y de laderas, influencia de la atmósfera y el ángulo de observación, modifican el comportamiento espectral de la superficie terrestre.

Las clases obtenidas cuando se realiza una clasificación deben ser espectralmente diferentes unas de otras, y además deben contener un valor informativo de interés para la investigación en cuestión (Sacristán, 2007). En cuanto al procedimiento, la clasificación de imágenes se divide en dos grandes grupos: supervisada y no supervisada (Eastman, 2004; Sacristán, 2007; Lira, 2010). El enfoque de tipo supervisado requiere un entrenamiento del clasificador, a través de un conocimiento previo del área del terreno que se ha de seleccionar como muestra representativa de las clases informacionales que se quieren identificar en la imagen (Sacristán, 2007). En este tipo de clasificación, los píxeles de la imagen son asignados a clases espectrales de las cuales se tiene previo conocimiento a partir de la inspección de la imagen y de otras fuentes de información (Lira, 2010).

El enfoque no supervisado no precisa conocer previamente el terreno, y tiene el propósito de segmentar la imagen en una serie de clases por procedimientos exclusivamente numéricos, basándose sólo en la estructura que posean los datos espectrales (Sacristán, 2007). Este enfoque es válido únicamente cuando se supone que los objetos de la escena están caracterizados por clases espectrales bien definidas (Lira, 2010). Eastman, (2004) indica que un paso vital en cualquier tipo de clasificación es la evaluación de la precisión de las imágenes finales y menciona que un indicador de la calidad de la clasificación es la llamada matriz de confusión y el índice Kappa. La matriz de confusión es un arreglo matricial de probabilidades que muestra la posibilidad de identificación correcta para cada clase, mientras que el índice Kappa, es el indicador global de la calidad de la clasificación (Lira, 2010). Dicho de otra forma, los errores de omisión y comisión de una clasificación son denotados en la matriz de confusión, los primeros se refieren a una delimitación insuficiente de la categoría y los segundos a una demasiado amplia (Chuvieco, 1996).

Mapeo glaciar

Existen diferentes técnicas para discriminar los glaciares de otros objetos de la superficie de la tierra. Paul, (2000) menciona que segmentación imágenes en diversas combinaciones de bandas Thematic Mapper (TM) (ejemplo: TM3/TM5 y TM4/TM5), técnicas de clasificación supervisada y no supervisada, son algunos de los métodos para identificar glaciares mediante el uso de imágenes de satélite.

Por otra parte, Bolch y Kamp, (2006) mencionan que el análisis morfométrico en combinación con modelos digitales de elevación de alta resolución produce resultados satisfactorios en la identificación glaciar. Los principales factores que influyen en la

precisión del mapeo de glaciación y que han sido mencionados en otros estudios son la existencia de sombra proyectada y glaciares cubiertos por escombros (Paul *et al.*, 2002).

En combinación de bandas TM, Hall *et al.*, (1987); Kääb *et al.*, (2002); Paul *et al.*, (2002); Bolch y Kamp, (2006); Qinghua *et al.*, (2006) han utilizado la relación de bandas TM4/TM5 para identificar la nieve a partir de números digitales.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

En este trabajo se evaluaron los glaciares de las tres montañas más altas de México: 1) el volcán Pico de Orizaba (o Citlaltépetl que significa “Montaña de la Estrella” en lengua náhuatl), representa la cima más alta del país con 5,674 msnm (19° 01' N, 97° 16' W) y su cima sirve como punto limítrofe entre los estados de Veracruz y Puebla (Yarza, 1992; Macías, 2005; Rodríguez *et al.*, 2006). Es el volcán activo más alto de Norteamérica y debido a su altura, su cima permanece cubierta de nieve a lo largo de todo el año (Rodríguez *et al.*, 2006), formando parte del Eje Neovolcánico Transversal, bajo el nombre de Sierra Nevada o “Poyauhtecatl” se conoce a una zona que se extiende en dirección NNW a SSE a lo largo de más de 100 km, y que está enclavada en los estados de México, Morelos y Puebla (Vega-López y Álvarez, 1992). De norte a sur se localizan sus volcanes principales: el Tláloc, de 4,150 m de altura; el Telapón, de 3,996, el Papayo y el Tecamac; el Iztaccíhuatl y el Popocatépetl (Yarza, 1992). 2) volcán Popocatépetl e 3) Iztaccíhuatl. El Popocatépetl es la segunda altura de la República Mexicana (5,452 msnm) y sirve de límite a los estados de México, Puebla y Morelos (Yarza, 1992). El Popocatépetl se sitúa a unos 65 km al Sudeste de la Ciudad de México y a 45 km al Oeste de la Ciudad de Puebla (Macías, 2005, Tanarro *et al.*, 2004).

El volcán Iztaccíhuatl (19°03' - 19°20' N y 98°26' - 98°47' W), es la tercera cumbre más alta de México, se localiza en la porción central de la Sierra Nevada, a 70 km al Sureste de la Ciudad de México (García-Romero, 2004). El Iztaccíhuatl o “mujer blanca” presenta una longitud de aproximadamente 7 km formando parte de los estados de México y Puebla

(Vega-López y Alvarez, 1992), presenta tres principales alturas: la cabeza, con 5,146 m; el pecho, con 5,286 m y los pies, con 4,740 msnm (Yarza, 1992).

Obtención de imágenes satelitales

Para este estudio se obtuvieron 21 escenas satelitales para el volcán Popocatepetl (Path = 26, Row = 47), 20 para el Iztaccíhuatl (Path = 26, Row = 47) y 17 para el Pico de Orizaba (Path = 25, Row = 47). Las imágenes se descargaron del sitio web del Global Visualization Viewer (GloVis) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (<http://glovis.usgs.gov/>), de los sensores TM 4, TM 5 y EMT+, de los satélites Landsat 4, 5 y 7 respectivamente.

De las áreas de estudio, se seleccionó una escena por año buscando que estuviera libre de nubes, y que perteneciera a la misma época del año (enero, febrero, marzo y abril), como lo proponen Brizuela *et al.*, (2007).

Corrección de imágenes

El primer paso fue realizar la corrección atmosférica para eliminar los efectos de la atmósfera sobre la radiación. Esto se realizó mediante el método de valor mínimo que consiste en restar el Número Digital (DN) mínimo de cada banda a la misma banda (Chuvieco, 1995). El resultado es una imagen de mayor contraste. El segundo paso fue la conversión de radiancia espectral a reflectancia TOA. Esto se realizó según se describe en Chander y Markham, (2003) y Chander *et al.*, (2009), que además mencionan que este es el paso fundamental para poner los datos de imágenes de múltiples sensores y plataformas a una escala radiométrica común. Ambos pasos se hicieron mediante modelos gráficos

generados en el módulo Model Maker del programa ERDAS IMAGINE 2010 (versión de prueba).

Identificación de glaciares

En esta investigación se aplicaron los dos primeros métodos de mapeo mencionados por Paul, (2000). De cada escena, se hizo un corte para extraer el área de interés, para disminuir la variabilidad de los datos. Para el volcán Pico de Orizaba, se hicieron clasificaciones de prueba con 30, 35, 40, 45 y 55 clases. En el Popocatepetl e Iztaccíhuatl, se hicieron también clasificaciones de prueba desde 25 hasta 65 clases. En el método de relación de bandas, algunos autores (Hall *et al.*, 1987; Paul *et al.*, 2002; Kääb *et al.*, 2002; Bolch y Kamp, 2006; Qinghua *et al.*, 2006) han utilizado la relación de bandas TM4/TM5 a partir de Números Digitales.

Los dos métodos se realizaron en 4 escenas del mismo año en cada volcán. Se hizo el cálculo de la superficie glaciaria para cada método. Se comparó la superficie de glaciaria identificada en ambos métodos y se definió el mejor método de mapeo para el resto de las escenas. La precisión de las clasificaciones fue evaluada mediante el método matriz de confusión, la cual se obtuvo usando el programa ERDAS IMAGINE v. 2010 (versión de prueba).

Relación de glaciares entre volcanes estudiados

Para definir si existe alguna relación en las fluctuaciones de glaciares entre los tres volcanes se aplicó un análisis de correlación de Pearson para los tres volcanes (valores sombreados

en gris de la Tabla 3). Posteriormente se realizó regresión lineal simple para los volcanes que presentaron entre sí alguna relación significativa.

Tendencia de superficie de glaciares y detección de cambios

Méndez *et al.*, (2007) asocian los cambios de tendencias a factores climáticos y las definen como cambios graduales de incremento o decremento en el tiempo de las variables estudiadas. En este trabajo se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall para descubrir qué tipo de tendencia (estable, incremento o decremento) existe en la superficie glaciar del volcán Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba. Los mismos autores mencionan que la prueba Mann-Kendall ha sido usada ampliamente en ciencias ambientales, ya que puede analizar datos sin importar la distribución, datos perdidos y estacionales.

Se han desarrollado algunos métodos para detectar un cambio de régimen o discontinuidad en series de tiempo (Rodionov, 2004). Los cambios de régimen se definen como reorganizaciones rápidas de los ecosistemas de un estado relativamente estable a otro (Rodionov y Overland, 2005). Por lo general, estos métodos emplean técnicas estadísticas estándar, como Student o pruebas de Mann-Kendall, o sus modificaciones (Rodionov, 2004). En este trabajo se aplicó el método Rodionov para la detectar cambios en el tiempo de la superficie glaciar de cada volcán (Rodionov, 2004).

Relación del ENSO y los glaciares

Para determinar la posible influencia del ENSO sobre la dinámica glaciar de los volcanes estudiados, se utilizaron los valores bimestrales del MEI (Índice Multivariado del ENSO),

publicados en el sitio web: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/rank.html>, haciendo análisis de correlación de Pearson entre la superficie glaciaria de cada volcán y los valores bimestrales del MEI. Posteriormente se identificó la correlación con mayor significancia en cada volcán y se aplicó regresión lineal simple para reconstruir la superficie glaciaria en base al registro histórico del MEI.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Corrección radiométrica de imágenes satelitales

Caracterización y calibración radiométrica es un requisito previo para la creación de datos científicos de alta calidad y, en consecuencia productos de alto nivel (Chander *et al.*, 2009). En el mismo sentido Lira (2010), menciona que es necesario hacer corrección atmosférica cuando se tiene un conjunto de imágenes que describen la evolución en el tiempo de una escena; como es el caso de este estudio. En la Figura 1 se muestran algunos resultados de las correcciones realizadas.

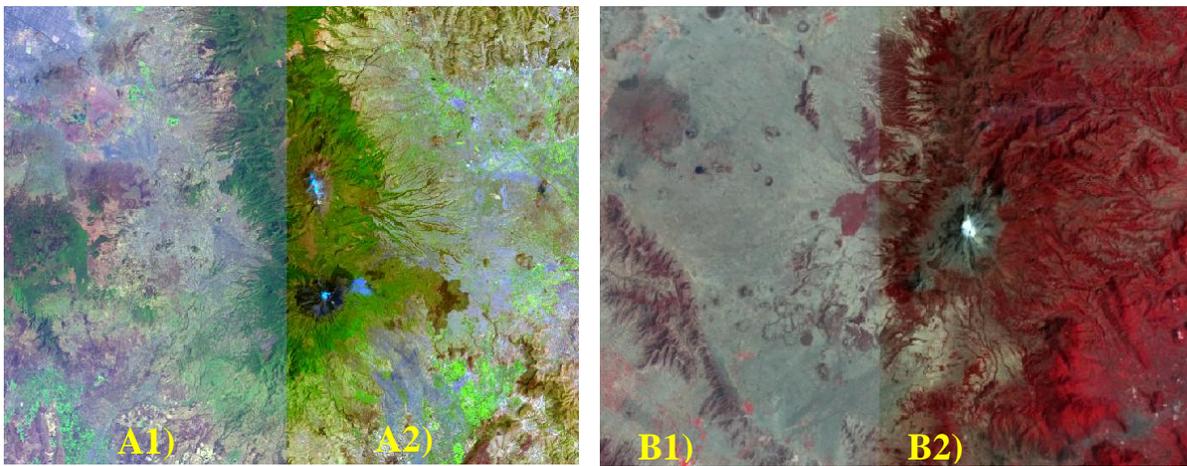


Figura 1. Resultados de la corrección atmosférica por el método de valor mínimo (Chuvienco, 1996); A) volcán Popocatépetl e Iztaccíhuatl (Path = 26, Row = 47, tomada el 16 marzo de 1986); B) volcán Pico de Orizaba (Path = 25, Row = 47, tomada el 23 de marzo de 1986); 1) escena antes de la corrección y 2) escena posterior a la corrección.

Otra forma de observar el efecto de la corrección atmosférica es revisando la dispersión de los valores digitales en el histograma de la imagen. En la Figura 2 se muestra un ejemplo.

En la Figura se observa además, el desplazamiento que sufren los pixeles hacia el origen, que es considerable si se hace la comparación con el mismo histograma antes de la corrección. Contrariamente a la corrección atmosférica, la conversión de radiancia espectral a reflectancia TOA no ofrece ninguna prueba visual de que la imagen haya cambiado. Adicionalmente en la Figura se muestra una forma de visualizar el cambio de números digitales (B) a valores absolutos (b), producto de la conversión mencionada.

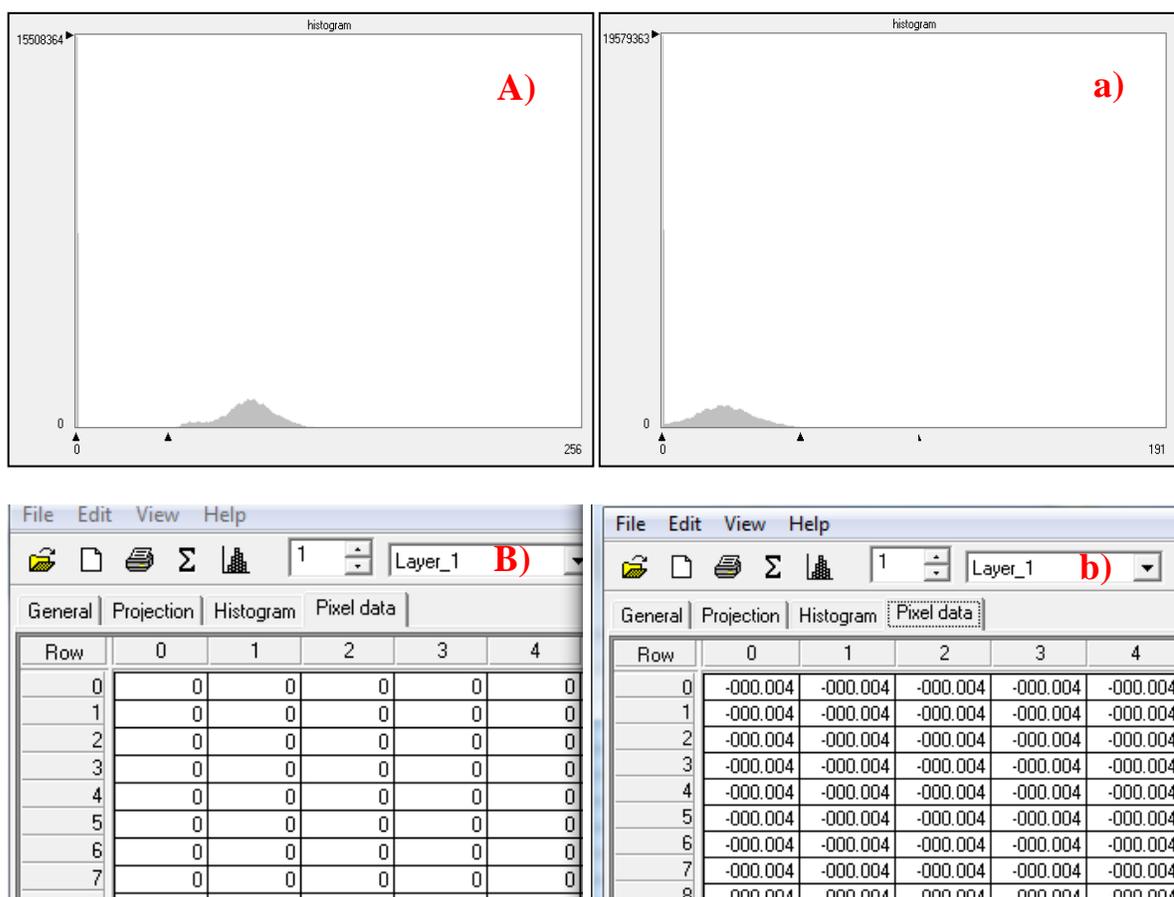


Figura 2. Resultados de la corrección atmosférica y de la conversión de unidades; A) Histograma de la imagen antes de la corrección atmosférica y a) Histograma posterior a la corrección atmosférica (escena Path = 26, Row = 47; tomada el 16 de marzo de 1986); B) valor del pixel antes de la conversión de radiación espectral a reflectancia TOA y b) valor del pixel posterior a la conversión.

Superficie glaciar de los volcanes estudiados

Para el Pico de Orizaba, la clasificación de 45 clases fue la que visualmente coincidió mejor con la superficie del glaciar y las clases que pertenecieron a la nieve fueron en la mayoría de las escenas la 43, 44 y 45 y solo en algunas la clase 37 y 39. En el Popocatepetl y el Iztaccíhuatl la mejor clasificación fue la de 65 clases y fueron las 61, 62, 63, 64, 65 las que pertenecieron al glaciar en la mayoría de las escenas.

El método de algebra de bandas solo se aplicó para comparación a 4 escenas de cada volcán (1986, 1994, 1998 y 2009). En la Tabla 1 se muestra una comparación de la superficie glaciar obtenida por ambos métodos. Los resultados muestran que para el caso del volcán Popocatepetl la superficie identificada aumentó un 4.1 % en el método de algebra de bandas con respecto al método no supervisado; para el volcán Iztaccíhuatl aumenta 10.30 % y en el Pico de Orizaba 22.5 % aproximadamente. En la Figura 3 se observa gráficamente una comparación de ambos métodos.

En algunas de las escenas en que se comparó, el método de relación de bandas (TM4/TM5) presentó dificultades en la identificación del glaciar, que consisten en la inclusión como glaciar algunos pixeles que no lo son, por lo tanto, la sobreestimación de la superficie glaciar. Estos errores pueden identificarse visualmente, como se muestra en la Figura 4. Los errores se ubican principalmente en las zonas de la escena en la que existe sombra proyectada, como lo mencionan Paul *et al.*, (2002). Por lo anterior, se optó por la técnica de clasificación no supervisada para procesar las imágenes restantes. En la Tabla 2 se muestran los resultados de la evaluación de las clasificaciones. En la Tabla 3 se presentan las superficies de glaciar identificadas para cada volcán.

Tabla 1. Comparación de superficie glaciara de 4 escenas para el volcán Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba, ubicados en la Faja Volcánica Transmexicana, obtenidas mediante dos diferentes métodos de mapeo.

Año	Popocatepetl (ha)		Iztaccíhuatl (ha)		Pico de Orizaba (ha)	
	CNS	RB	CNS	RB	CNS	RB
1986	73.71	92.79	135.99	72.72	126.09	163.4
1994	61.20	68.82	66.60	62.46	227.43	313.7
1998	168.21	133.8	436.77	569.6	80.91	84.78
2009	65.88	88.74	54.65	61.29	92.25	83.61

CNS = clasificación no supervisada; RB = relación de bandas (TM4/TM5).

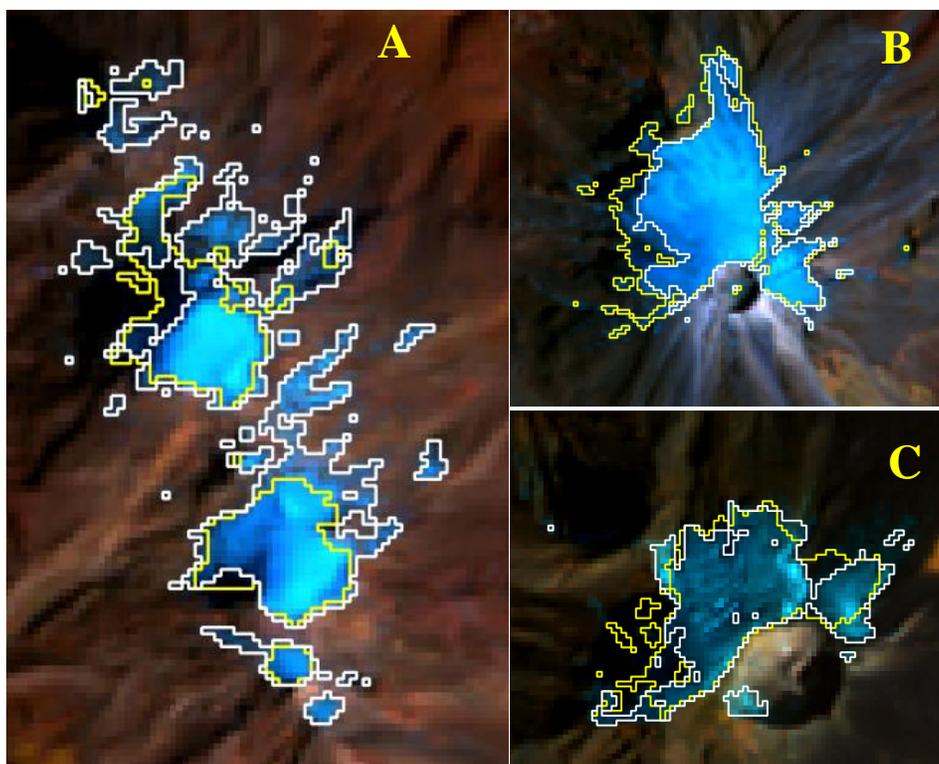


Figura 3. Comparación de dos diferentes métodos de mapeo glaciar: línea amarilla relación de bandas (TM4/TM5); línea blanca, clasificación no supervisada. En el volcán: A) Iztaccíhuatl, B) Pico de Orizaba y C) Popocatépetl. Escenas Landsat TM de 1986 en falso color RGB (Rojo = banda 5, Verde = banda 4 y Azul = banda 1).

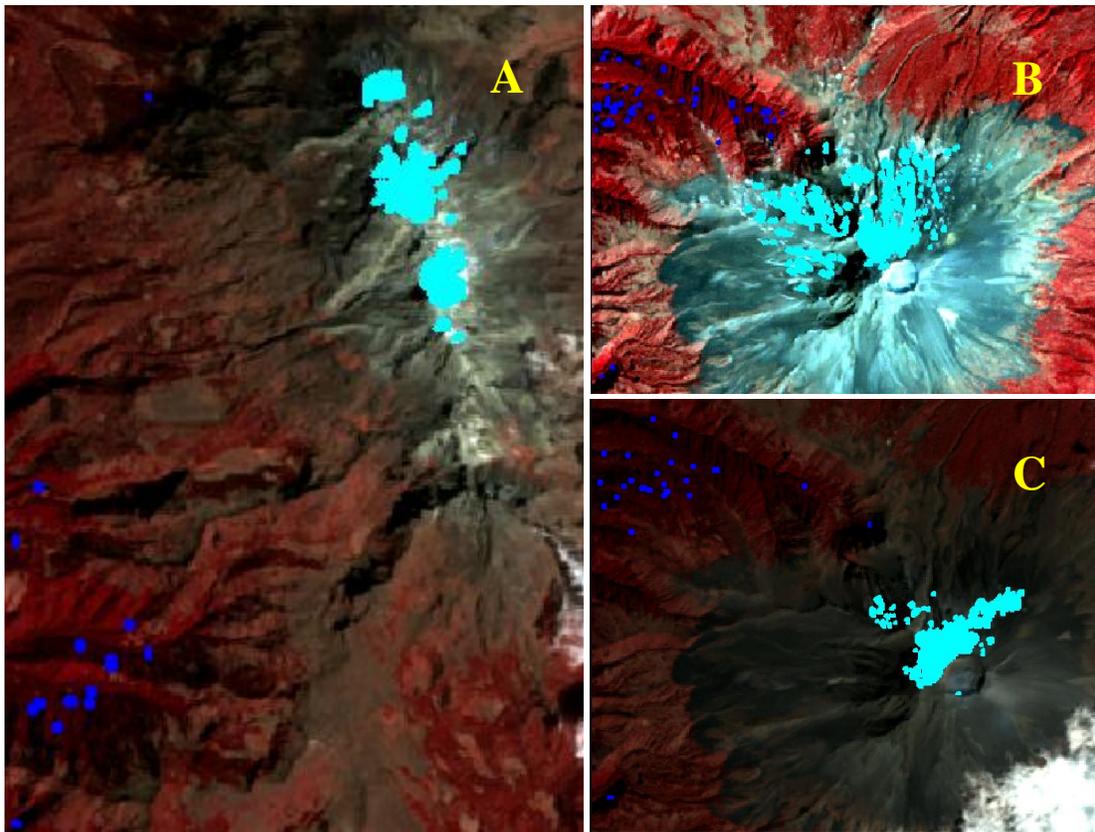


Figura 4. Errores en la identificación de glaciar en el método relación de bandas (TM4/TM5). Se muestran los pixeles mal asignados en color azul y en color turquesa los correctamente asignados como nieve glaciar. A) Iztaccíhuatl, escena del 2 de febrero de 2009; B) Popocatépetl, escena del 4 de febrero de 1998 y C) Popocatépetl tomada en misma fecha que A.

Tabla 2. Estadísticos Kappa para la evaluación de calidad del método de clasificación no supervisada, realizada en 4 escenas para los volcanes Popocatépetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba.

Año	Índice Kappa		
	Popocatépetl	Iztaccíhuatl	Pico de Orizaba
1986	1.0000	0.8770	0.9417
1994	1.0000	1.0000	0.8936
1998	0.7802	0.8364	0.9429
2009	1.0000	0.7495	1.0000

Índice Kappa = valor que fluctúa de 1 a -1, donde un valor de -1 indicaría una clasificación totalmente errónea y 1 una clasificación perfecta (Lira, 2010).

En la Tabla 2 se puede observar que los valores más altos del índice Kappa se dieron en el volcán *Pc* e *PO* y en menor medida para el *Ic*. Una explicación para esto podría fundarse de acuerdo a la dispersión del glaciar. Sí se relaciona conjuntamente la Tabla 2 con la Figura 5 se puede observar que a mayor dispersión del glaciar, el índice Kappa para esa clasificación disminuye y viceversa. Ejemplo de ello se muestra en el año 1998 del *Pc* en donde el área glaciar se encuentra muy fragmentada y el valor Kappa de dicha clasificación es de 0.7802, ocurre lo mismo para el *PO* en el año 1994.

En la Tabla 3 se puede observar que existe un dato extremo de superficie glaciar para cada volcán (también representado en las escenas de la Figura 6). El Popocatépetl e Iztaccíhuatl

presentan este valor en el año 2010, mientras que para el Pico de Orizaba se encuentra en el año 1992 (ver números en negritas).

Tabla 3. Superficie glaciaria identificada en el volcán Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba de 1985 a 2010, mediante la técnica de clasificación no supervisada de datos Landsat TM y ETM+.

Año	Superficie glaciaria (hectáreas)		
	Popocatepetl	Iztaccíhuatl	Pico de Orizaba
1984	*	*	167.67
1985	93.33	136.44	*
1986	73.71	135.99	126.09
1987	68.13	233.73	*
1989	60.39	53.73	408.33
1990	81.00	*	*
1991	507.06	607.86	*
1992	*	*	2,797.38
1993	180.81	301.68	146.34
1994	61.20	66.60	227.43
1995	90.81	167.49	247.77
1996	33.57	52.92	219.51
1997	35.37	73.80	369.54
1998	168.21	436.77	80.91
1999	0.00	41.13	136.80
2000	0.00	143.91	134.82

2001	0.00	40.77	102.15
2002	181.80	598.59	183.51
2003	247.77	165.78	15.30
2007	169.47	436.77	*
2008	127.71	436.77	*
2009	65.88	54.65	92.25
2010	3,294.18	4,393.89	*
2011	*	*	141.57

*Años sin datos

En consecuencia surge la incógnita de que tanto podría afectar este valor (valores en negritas de la Tabla 3) en el comportamiento de la tendencia de la superficie glaciar y en general como influiría en las pruebas que se aplicaron en este estudio. Por lo anterior se tuvo la necesidad de realizar las pruebas incluyendo y excluyendo el valor extremo. Los campos que aparecen con guiones en la Tabla 3 corresponden a años en los cuales las imágenes de satélite presentaron algún problema, principalmente líneas sin datos y nubosidad. El volcán Popocatepetl presenta tres años en los cuales el método de mapeo no identifico ninguna superficie glaciar. De acuerdo a algunos autores (Macías, 2005; Miranda *et al.*, (2007) este volcán se mantuvo activo durante estos años. Además Macías, (2005), menciona que el *Pc* se ha mantenido activo en los años de 1994, 1995, 1996, 1997 hasta 2000 y 2001, donde ocurrieron explosiones que fueron precedidas por sismos vulcanotectónico.

En la Figura 5 se muestran las variaciones que ha tenido la superficie glaciar en cada volcán en los años 1986, 1994, 1998 y 2009, se puede observar que para el caso del Popocatepetl (A) la cantidad de nieve no tiene gran variación, excepto por el año 1998 (A3), donde se presenta un considerable avance en dirección Noroeste. Al respecto, Capel, (1999) y Timmermann *et al.*, (2010) mencionan que en los años 1997-1998 se presentó El Niño más intenso del siglo, el cual provocó fuertes anomalías climáticas a nivel mundial, como la temperatura media del aire (a 5,500 msnm) en toda la franja ecuatorial la cual mostró 4.3 desviaciones estándar por encima de los valores medios climatológicos entre enero y abril de 1998 (Aceituno, 1998).

Particularmente, en América del Norte las precipitaciones fueron muy superiores al promedio a lo largo del pacífico (Capel, 1999), lo que podría explicar que *Pc* (A3) y *Ic* (B3) hayan presentado un avance glaciar en ese año y no así el *PO* (C3) el cual se encuentra ubicado más cerca al Océano Atlántico. Además se puede observar en la Figura que la ubicación de la nieve en todos los años se da en la exposición Norte, lo que podría ser a causa de la diferencia radiación que se recibe la exposición Sur con respecto a la Norte.

De igual forma para el volcán Iztaccíhuatl (B) presenta una alteración el mismo año (B3), con la diferencia que el avance se presenta notoriamente hacia el Noreste. En el caso del Pico de Orizaba (C) la mayor variación se da en el año 1994 (C2) y a diferencia de los volcanes anteriores el avance glaciar se da en dirección Sureste y no uniformemente, sino en manchones. La similitud entre los dos primeros volcanes (A y B) puede deberse a que los dos se ubican en la misma porción de la FVT, mientras que el Pico de Orizaba se encuentra en el lado oriental de la misma.

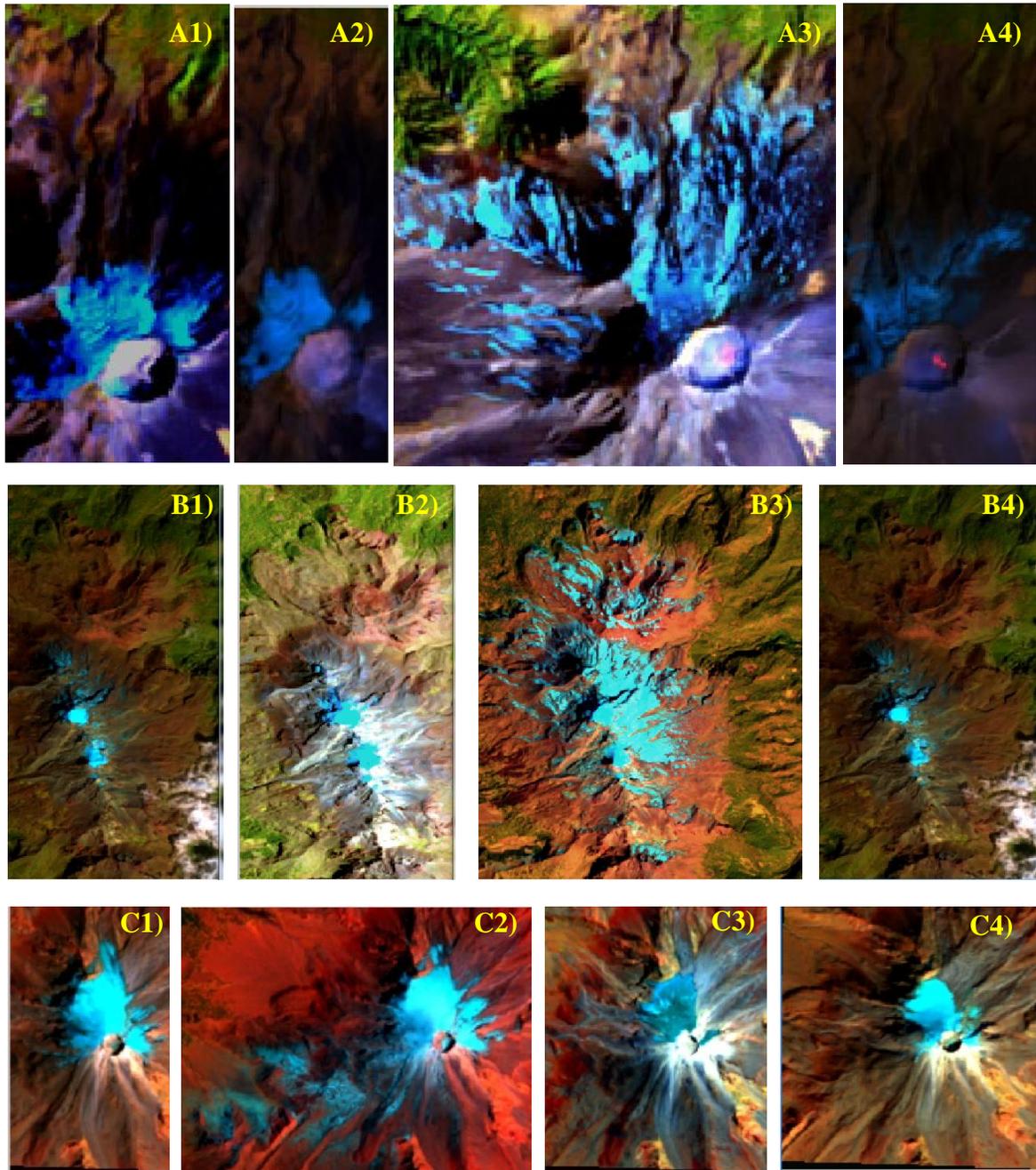


Figura 5. Fluctuaciones en la superficie glaciar del volcán A) Popocatepetl (escala 1:50,000); B) Iztaccíhuatl (escala 1:70,000) y C) Pico de Orizaba (escala 1:50,000); en los años 1) 1986; 2) 1994; 3) 1998 y 4) 2009; ubicados en la Faja Volcánica Transmexicana.

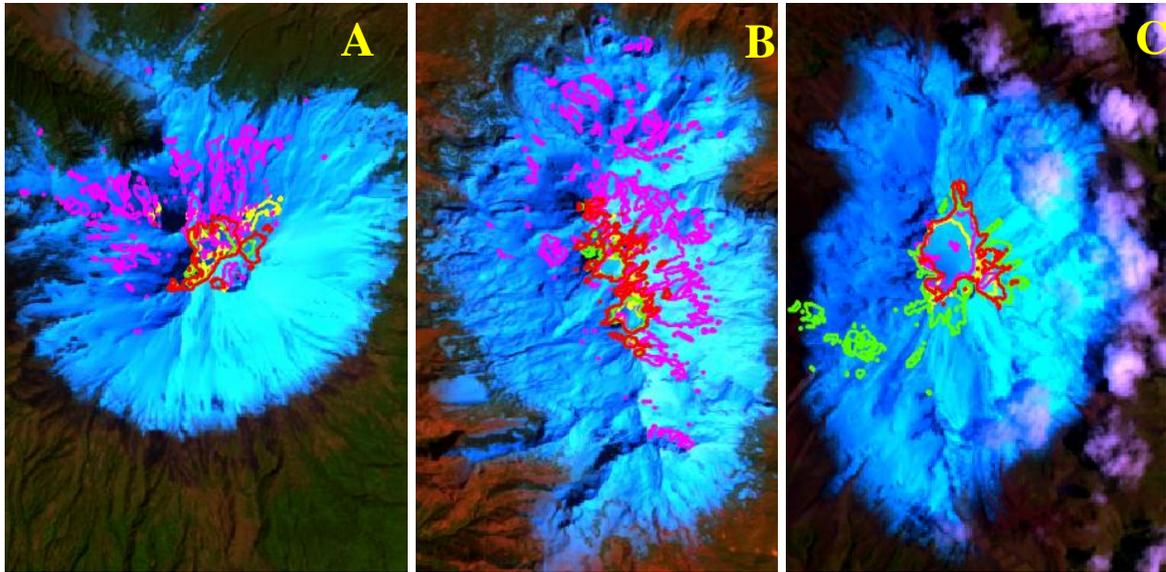


Figura 6. Delineación de la fluctuación glaciar en el volcán: A) Popocatepetl, B) Iztaccíhuatl (año 2010 para ambos) y C) Pico de Orizaba (año1992). Fluctuación glaciar: año 1986 (rojo); año 1994 (verde); año 1998 (rosa) y año 2009 (amarillo); Composición en falso color de escenas (Rojo = banda 5; Verde = banda 4; Azul = banda1).

Se obtuvo la matriz de confusión para las mismas cuatro escenas que se compararon con el método relación de bandas (1986, 1994, 1998 y 2009). La Tabla 3 muestra los valores promedio del índice kappa para cada clasificación, aclarando que solo se presentan los valores de las clases de interés, en este caso, las correspondientes al glaciar. Adicionalmente se observa que los valores del índice Kappa arrojados en la matriz de confusión son cercanos a 1, por lo que se consideran las clasificaciones como aceptables.

Estimación de superficie glaciar entre volcanes estudiados

El análisis de correlación que se realizó entre los tres volcanes (datos sombreados de la Tabla 3) muestra que al menos dos volcanes presentan una relación significativa ($p \leq 0.10$)

entre sí (Tabla 4). Existe una correlación positiva entre la superficie glaciar del Iztaccíhuatl y el Popocatépetl ($r = 0.6749$; $p = 0.0227$), con un nivel de significancia superior al 95 %.

El Popocatépetl y el Pico de Orizaba presentan una correlación negativa ($r = -0.654$; $p = 0.0289$) con el mismo nivel de significancia que la anterior. Esto indica que cuando el volcán Iztaccíhuatl aumenta su superficie glaciar el Popocatépetl lo hace de igual manera; por el contrario para el Pico de Orizaba, su glaciar disminuye mientras el Popocatépetl tiene tendencias positivas. La Figura 7 muestra los gráficos correspondientes a la regresión lineal simple y bandas de predicción al 95 % de confiabilidad. Los estadísticos de referencia para cada una de las ecuaciones se muestran en la Tabla 5.

Tabla 4. Resumen del análisis de correlación lineal entre la superficie glaciar de los volcanes Popocatépetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba de México.

Volcán vs Volcán		Popocatépetl	Iztaccíhuatl	Pico de Orizaba
Popocatépetl	r		0.6749	-0.6543
	p		0.0227	0.0289
Iztaccíhuatl	r	0.6749		-0.3415
	p	0.0227		0.3040
Pico de Orizaba	r	-0.6543	-0.3415	
	p	0.0289	0.3040	

r = valor del coeficiente de correlación de Pearson (este valor oscila de -1 a +1); p = nivel de significancia de la correlación.

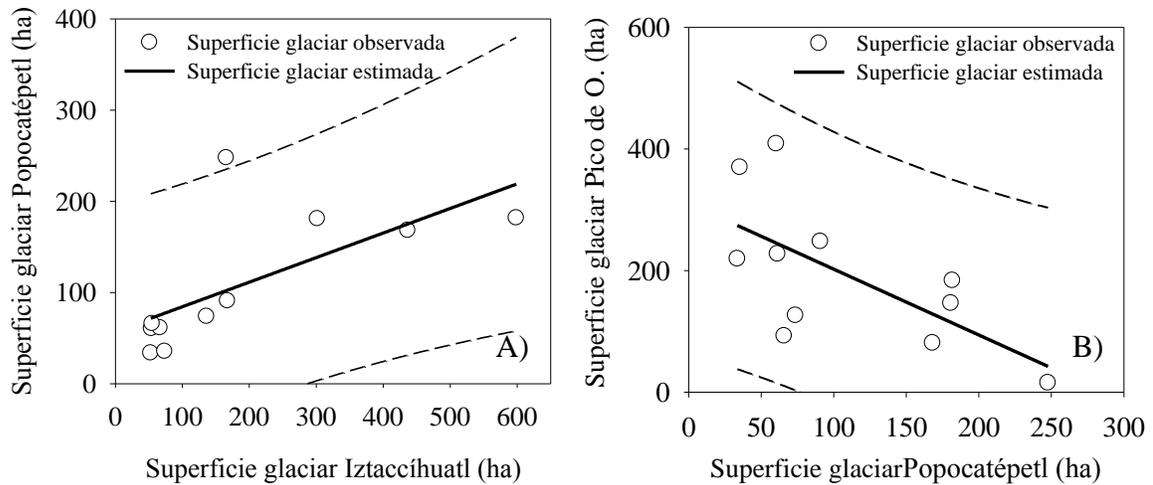


Figura 7. Regresión lineal simple entre las superficie glaciara del volcán Popocatepetl e Iztaccíhuatl (A) Pico de Orizaba versus Popocatepetl (B).

Tabla 5. Estadísticos básicos de las ecuaciones de regresión para la estimación de la nieve glaciara entre el volcán Popocatepetl e Iztaccíhuatl (Pc vs Ic) y Pico de Orizaba y Popocatepetl (PO vs Pc).

	R	P	C	S.E.	t	p	R	R²	R² aj.	S.E.E.
<i>Pc vs Ic</i>		A	57.4020	25.3494	2.2644	0.0498	0.6749	0.4555	0.3950	56.3133
		B	0.2695	0.0982	2.7438	0.0227				
<i>PO vs Pc</i>		A	310.4994	53.8190	5.7693	0.0003	0.6543	0.4282	0.3646	95.4709
		B	-1.0825	0.4170	-2.5959	0.0289				

R = regresión; Pc = Popocatepetl; Ic = Iztaccíhuatl; PO = Pico de Orizaba; P = parámetro;

C = coeficiente de regresión; S.E. = error estándar del coeficiente; t = valor de t; P =

significancia; R = coeficiente de determinación; R^2 = coeficiente de determinación cuadrado; R^2 aj. = coeficiente de determinación cuadrado ajustado; S.E.E. = error estándar de la regresión.

Tendencias de superficie glaciar de los volcanes analizados

En las pruebas realizadas de tendencia de glaciares, se utilizó el mismo principio descrito anteriormente, consistente en realizar la prueba Mann-Kendall incluyendo y excluyendo el dato extremo para cada volcán. Los resultados muestran que solo el Pico de Orizaba presenta una tendencia negativa de -6.0986 ha por año, cuando no se incluye el valor extremo. Los demás volcanes no presentan alguna tendencia (incremento/decremento), lo que sugiere una tendencia estable de la superficie de los volcanes estudiados durante el periodo que se analizó en este trabajo.

Tabla 6. Resultados del análisis de tendencia de superficie glaciar mediante la prueba Mann-Kendall para los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba de México, incluyendo y excluyendo el valor extremo de cada volcán.

Análisis de tendencia	V	MK	P	T	S	M
Popocatepetl(i)	Nieve	13	0.6942		0.9034	81.0000
Popocatepetl (e)	Nieve	-7	0.8200		-0.2962	77.3550
Iztaccíhuatl (i)	Nieve	23	0.4547		2.5414	154.8450
Iztaccíhuatl (e)	Nieve	4	0.8885		0.0460	143.9100
Pico de Orizaba (i)	Nieve	-50	0.0394	-	-6.0986	146.3400

Pico de Orizaba (e)	Nieve	-40	0.0717	-4.9497	143.9550
---------------------	-------	-----	--------	---------	----------

(e) = prueba con dato extremo; (i) = prueba sin dato extremo; V = variable (ha); MK estadístico de Mann-Kendall; P = valor de p; T = tendencia (positiva/negativa); S = pendiente o cambio (has por años); M = media o mediana.

Cambio de régimen en la superficie glaciaria

En este trabajo se aplicó la prueba no paramétrica desarrollada por Rodionov (2004) para la detección de cambios en series de tiempo. Algunas de las ventajas del método son la capacidad de procesar datos en tiempo real, la señalización de la aparición de un cambio potencial, no requiere inspección visual de la serie de tiempo y que puede procesar series de tiempo con múltiples cambios (Rodionov y Overland, 2005). Al igual que la prueba de tendencias, el método Rodionov se aplicó incluyendo y excluyendo el valor extremo para cada volcán. La Figura 8 muestra los resultados de esta prueba.

En la figura se observa que tomando en cuenta el valor extremo, el método no detecta la presencia de algún cambio en ningún volcán. De manera diferente cuando se toma en cuenta el valor extremo. Para el volcán Popocatepetl (A) el método no presenta ningún cambio cuando se incluye y excluye su valor extremo. En el volcán Iztaccíhuatl (B2) existe un cambio positivo aproximadamente en el año 2003, lo que indica que la superficie glaciaria a partir de ese año se incrementó. El caso contrario es para el Pico de Orizaba (C2), que en el mismo año (2003) muestra un cambio negativo, lo que indica una disminución de la superficie glaciaria de este volcán. La prueba se realizó a un nivel de significancia de 0.05.

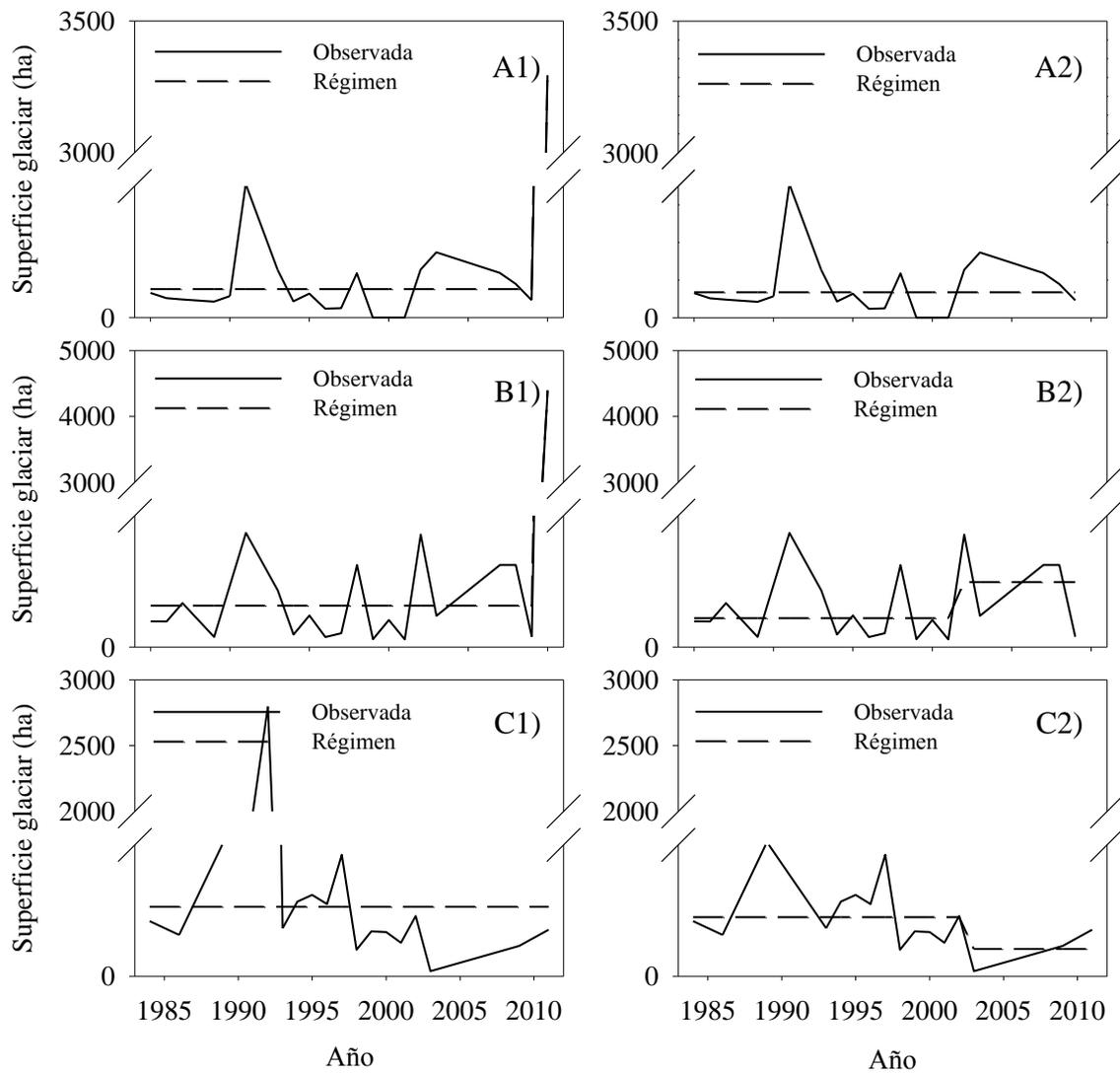


Figura 8. Método Rodionov para la detección de cambios de régimen en la superficie glaciar de las series de tiempo evaluadas para los volcanes A) Popocatepetl, B) Iztaccíhuatl y C) Pico de Orizaba; 1) cuando se incluye el valor extremo y 2) cuando se excluye.

El ENSO y la dinámica de los glaciares estudiados

Durante años de El Niño, los glaciares tropicales experimentan balances de masa anuales muy negativos, que aceleran particularmente su tendencia de recesión (Francou *et al.*, 2003). No se tiene conocimiento de que se haya realizado para México algún estudio que investigue la interacción del fenómeno de El Niño con las fluctuaciones glaciares. Los resultados de correlación entre el MEI y la superficie glaciar de cada volcán se muestra como sigue: las mayores correlaciones se presentan sombreadas de color gris en la Tabla 7. Para el Popocatepetl y el Pico de Orizaba la mayor correlación se presentó cuando se incluye el valor extremo; para el primero la mayor correlación fue de $r = 0.4622$ y $p = 0.0402$ y ocurre con el valor de diciembre-enero del MEI; y el segundo de $r = 0.3600$ y $p = 0.1558$ con los meses marzo-abril.

Situación contraria se observó para el Iztaccíhuatl, que mostró una correlación de $r=0.4303$ y $p = 0.0659$ con los mismos meses que el Popocatepetl pero sin tomar en cuenta su valor extremo. Además se observa que las mayores correlaciones existen con los primeros meses del año (del registro del MEI), esto puede deberse a que las imágenes utilizadas en este trabajo pertenecen principalmente a la época mencionada; además Francou *et al.*, (2003), indican que el balance de masa glaciar está estrechamente relacionado con las condiciones atmosféricas durante los meses de verano austral de octubre a abril, en particular durante diciembre-febrero; y sobre todo considerando las variables de las cuales se compone el MEI, mencionadas anteriormente.

Tabla 7. Resumen del análisis de correlación de Pearson realizada entre superficie glaciar de tres volcanes más altos de la Faja Volcánica Transmexicana y los valores bimestrales del MEI ($17 < n > 21$).

C	E	MEI						
		dic-ene	ene-feb	feb-mar	mar-abr	jul-ago	ago-sep	oct-nov
<i>Pc</i> (e)	r		0.3895	0.3708		-0.3830	-0.3822	-0.3770
	p		0.0896	0.1075		0.0956	0.0963	0.1013
<i>Pc</i> (i)	r	0.4622	0.4298	0.4088	0.3959			
	p	0.0402	0.0586	0.0735	0.0840			
<i>Ic</i> (e)	r	0.4303						
	p	0.0659						
<i>Ic</i> (i)	r		0.3895			-0.3830	-0.3822	-0.3770
	p		0.0896			0.0956	0.0963	0.1013
<i>PO</i> (i)	r				0.3600			
	p				0.1558			

C = correlación; *Pc* = Popocatepetl; *Ic* = Iztaccíhuatl; *PO* = Pico de Orizaba; (e) = sin dato extremo; (i) = con dato extremo; E = estadístico; r = coeficiente de correlación de Pearson; P = significancia de la correlación; MEI = Índice Multivariado del ENSO (valores bimestrales).

Existe una serie de hechos que se pueden ligar para entender la influencia del ENOS sobre las fluctuaciones glaciares. Capel, (1999) caracteriza al fenómeno global (ENSO) a partir de las anomalías de viento, de la presión atmosférica o de la temperatura superficial marítima. Esta influencia se proyecta más allá del Océano Pacífico Tropical a través de teleconexiones que alteran los patrones del tiempo atmosférico (Paolini *et al.*, 2004). Mientras se manifiesta el impacto del fenómeno de El Niño en los Trópicos, sus efectos en latitudes templadas y frías (zona extratropical) son más variables debido a que la circulación atmosférica en las zonas extratropicales puede anular la influencia del ENSO de los trópicos (Capel, 1999). Hecho que se apoya en este trabajo, debido a que mientras algunos de los glaciares de los Andes Bolivianos presentan una tendencia de recesión, para los volcanes evaluados en este trabajo solo el volcán Pico de Orizaba muestra una tendencia de decremento (Tabla 6).

Ahora bien; Francou *et al.*, (2003) mencionan que durante los fenómenos de El Niño los glaciares tropicales experimentan un déficit de precipitación, exposición a temperaturas más altas y un aumento en la radiación de onda corta debido a la reducción de la cubierta de nubes. En relación a lo anterior, Méndez *et al.*, (2007) evidencian la existencia de teleconexiones entre el fenómeno del ENOS y la precipitación mensual en México, presentándose las más importantes en los meses de febrero, diciembre y noviembre. Adicionalmente se ha encontrado una tendencia negativa en la precipitación anual en las zonas más húmedas del territorio mexicano (Méndez *et al.*, 2008). Sin embargo, en los Andes Bolivianos durante los años de La Niña que se caracterizan por las bajas temperaturas, altas nevadas, y en menor grado, los vientos más constantes y alta humedad,

factores que se combinan para aumentar el albedo y la sublimación para oponerse a la fusión glaciaria (Francou *et al.*, 2004).

Adicionalmente a la relación del ENSO y la fluctuación glaciaria de los volcanes estudiados se menciona que durante los años 1991 y 1993 se presentaron notables fluctuaciones de glaciaria positivas para el volcán *Pc* e *Ic*, aunque para el *PO* esta alteración duró hasta el año de 1997.

El valor extremo que se presentó para este volcán en el año 1992, se observó durante una larga fase de El Niño (1991-1995), este balance positivo sucede de la misma manera pero con menor duración en el glaciario Chacaltaya en los Andes Bolivianos (Francou *et al.*, 2003), según este autor el balance de masa de este glaciario está fuertemente influenciado por las anomalías de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Tropical. Sin embargo, para México, en los tres glaciares de montaña evaluados en este trabajo, el mayor impacto de esta anomalía de El Niño se presenta para el glaciario ubicado más cercanamente al Atlántico. Lo cual lleva a la conclusión de que el fenómeno de El Niño mencionado anteriormente, tuvo una mayor duración para México y más intensamente en la parte del Atlántico, puesto que el incremento en el glaciario de *PO* se observa de 1989 a 1997, alcanzando su máximo en 1992 y presentando un promedio aproximado de 630.90 ha de glaciario durante este periodo; situación diferente en los glaciares de *Pc* e *Ic* que también se vieron afectados por este fenómeno pero en menor intensidad y su duración solo fue de 1991 a 1993, presentando un promedio glaciario de 343.94 ha para *Pc* y 454.77 ha para *Ic*.

Por los hechos anteriores podemos reforzar la hipótesis de que el fenómeno de El Niño sí influye de manera directa en las variaciones de los glaciares mexicanos. Adicionalmente en la Tabla 3 se muestran anomalías positivas en el año 2010 para el volcán *Pc* y *Ic*, al

respecto, Seager *et al.*, 2010 mencionan que en el invierno 1999/2010 se presentaron grandes nevadas en los estados del Atlántico y Sur de los Estados Unidos y Norte de Europa, esto se debió a una combinación de EL Niño y una Oscilación del Atlántico Norte (NAO) negativa, que representan anomalías en los patrones de precipitación y temperaturas frías de las zonas mencionadas. Es probable que las anomalías presentadas en estos años en los volcanes *Pc* e *Ic* sean consecuencia de la combinación de estos fenómenos.

Reconstrucción del perfil glaciar a partir de MEI

Dado que no se tiene información concreta sobre superficie glaciar de años anteriores a 1985, se realizó una regresión lineal simple con los pares de datos de superficie glaciar y los valores bimestrales del MEI que presentaron una relación significativa (los valores sombreados en gris de la Tabla 7) para generar una ecuación que permitiera estimar las fluctuaciones glaciares en cada volcán, a partir del año 1950, que es el año de inicio del registro histórico del MEI. Los resultados se muestran en la Figura 9. En las figuras se muestra la regresión lineal realizada para cada volcán (izquierda) y el perfil glaciar con la nieve observada (línea sólida) y la estimada (línea punteada). Los tres volcanes presentan alternados periodos de ascenso y descenso glaciar en los últimos 50 años.

Un dato importante respecto a la Figura 9 sucede cuando se toma en cuenta el valor extremo de cada volcán, la reconstrucción del perfil arroja algunos valores negativos en la predicción de superficie. No ocurre esto cuando se excluye de la prueba el valor extremo de superficie glaciar, puesto que ningún volcán arroja valor negativo durante la reconstrucción del perfil glaciar. Para el volcán *PO* no se realizó la reconstrucción tomando en cuenta el

valor extremo, puesto que no tuvo correlación significativa con ningún bimestre del MEI. Los estadísticos básicos de las regresiones antes mencionadas se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Estadísticos básicos del análisis de regresión lineal entre la superficie glaciar de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba y el valor bimestral del MEI de mayor correlación.

	R	P	C	S.E.	t	p	r	R²	R² aj.	S.E.E.
<i>Pc</i> (e)		<i>a</i>	18.4572	49.2028	0.3751	0.7120	0.4441	0.1972	0.1526	108.2676
		<i>b</i>	2.6572	1.2636	2.1029	0.0498				
<i>Pc</i> (i)		<i>a</i>	-173.3100	287.9167	-0.6019	0.5543	0.3747	0.1404	0.0952	669.0891
		<i>b</i>	12.6619	7.1878	1.7616	0.0942				
<i>Ic</i> (e)		<i>a</i>	82.9111	80.9159	1.0247	0.3199	0.4303	0.1852	0.1372	177.7325
		<i>b</i>	4.0846	2.0782	1.9655	0.0659				
<i>Ic</i> (i)		<i>a</i>	-165.2692	387.6172	-0.4264	0.6749	0.3895	0.1517	0.1046	900.5182
		<i>b</i>	17.5808	9.7991	1.7941	0.0896				
<i>PO</i> (i)		<i>a</i>	-98.0621	323.1114	-0.3035	0.7657	0.3600	0.1296	0.0715	620.2036
		<i>b</i>	12.0372	8.0553	1.4943	0.1558				

Pc = Popocatepetl; *Ic* = Iztaccíhuatl; *PO* = Pico de Orizaba; (e) = sin dato extremo; (i) = con dato extremo; R = regresión; P = parámetro; C = coeficiente; S.E. = error estándar del parámetro; t = valor de t; p = significancia; r = coeficiente de determinación; R² =

coeficiente de determinación cuadrado; R^2 aj.= coeficiente de determinación cuadrado ajustado; S.E.E.= error estándar de la regresión.

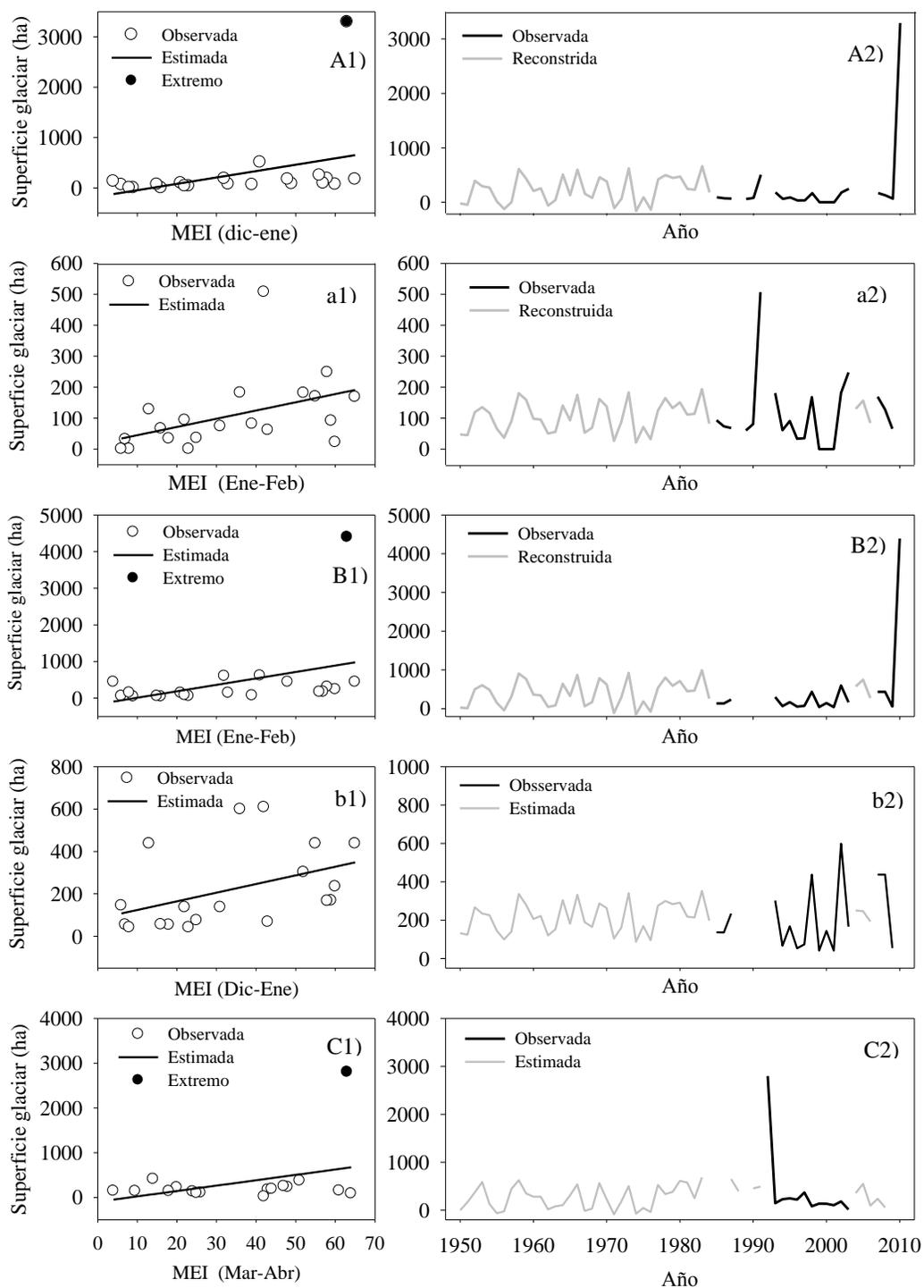


Figura 9. Regresión lineal simple entre la superficie glaciaria del volcán A) Popocatepetl, B) Iztaccíhuatl y C) Pico de Orizaba y los valores bimestrales del MEI, Mayúsculas = tomando en cuenta el valor extremo y Minúsculas = excluyendo el valor extremo; 1 = Gráfico de la regresión lineal simple y 2 = Reconstrucción del perfil glaciario a partir de la ecuación generada en 1.

V. CONCLUSIONES

El mejor método de identificación y clasificación glaciar para los volcanes estudiados fue la técnica de clasificación no supervisada. El método de álgebra de bandas sobreestimó la superficie glaciar desde 10 hasta 22 % en los volcanes estudiados. Existen correlaciones significativas ($p \leq 0.05$) entre la superficie glaciar de los volcanes estudiados, una positiva ($r = 0.6749$) entre Popocatépetl e Iztaccíhuatl y otra negativa ($r = -0.6543$) entre Pico de Orizaba y Popocatépetl. La superficie glaciar de los volcanes Popocatépetl e Iztaccíhuatl se ha mantenido estable durante el periodo estudiado, mientras que el Pico de Orizaba presenta un decremento de $-6.10 \text{ ha año}^{-1}$. El Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba muestran un cambio de régimen de superficie glaciar, a partir del año 2003, hacia arriba y hacia abajo respectivamente. El fenómeno del ENSO en su fase cálida, durante el invierno boreal, muestra correlación positiva ($0.3600 < r < 0.4622$; $0.0402 < p < 0.0896$) sobre la dinámica de la superficie glaciar de los volcanes estudiados.

VI. REFERENCIAS

- Aceituno P. (1998). El Fenómeno El Niño 1997-1998. *Bulletin de Institut Français d'Etudes Andines*, 27(3), 443–448.
- Álvarez L., J. (2010). Calidad y medio ambiente. *Ingeniería Industrial*, (28), 25–39.
- Araos, J., Godoi, M. A., & Carvalho, R. (2007). Variaciones recientes del lóbulo Zapata Sur, Glaciar Tyndall. Campo de Hielo Patagónico Sur (Chile). *Revista de Geografía Norte Grande*, (37), 75–84. <http://doi.org/10.4067/S0718-34022007000100006>
- Bolch, T. (2006). Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data. *Global and Planetary Change*, XX, 1–12. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.009>
- Bolch, T., & Kamp, U. (2006). Glacier Mapping in High Mountains Using DEMs , Landsat and ASTER Data. *Grazer Schriften Der Geographie Und Raumforschung*, 41, 37–48.
- Brizuela, A. B., Aguirre, C. A., & Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. *TELEDETECCIÓN- Hacia Un Mejor Entendimiento de La Dinámica Global Y Regional*, 207–214.
- Cabello, J., & Paruelo, J. M. (2008). La teledetección en estudios ecológicos. *Ecosistemas*, 17(3), 1–3.
- CAN. (2007). El Fin De Las Cumbres Nevadas? Glaciares y Cambio Climático en la Comunidad Andina. (T. E.I.R.L., Ed.). Lima, Perú. 103 p.

- Capel, J. J. M. (1999). El Fenómeno ENSO (El Niño/Oscilación del Sur) en 1997–1998: Inducidas en el Mundo. *NIMBUS*, (3), 37–62.
- Casanova, J. L. (1992). La teledetección en la enseñanza de la meteorología. *Serie Geográfica*, 2, 59–63.
- 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.
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, 893–903. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. (Ediciones RIALP S. A., Ed.) (Segunda Ed). Madrid, España. 449 p.
- Delgado, H. (2008). Patentan procedimiento para la formación de polímeros. *Gaceta UNAM*, (4,058), 31 p.
- Dyurgerov, M. B., & Meier, M. F. (2005). Glaciers and the changing earth system: a 2004 snapshot. *Institute of Arctic and Alpine Research*, (58), 117 p.
- Eastman, J. R. (2004). IDRISI Kilimanjaro Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes (Versión 14). Worcester, MA. USA. 296 p.

- Francou, B., Vuille, M., Wagon, P., Mendoza, J., & Sicart, J. E. (2003). Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16° S. *Journal of Geophysical Research*, 108(D5,4154), 1–12. <http://doi.org/10.1029/2002JD002959>
- Francou, B., Vuille, M., Favier, V., & Cáceres, B. (2004). New evidence for an ENSO impact on low-latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, °28'S. *Journal of Geophysical Research*, 109(D18106), 1–17. <http://doi.org/10.1029/2003JD004484>
- García-Romero, A. (2004). Dinámica del paisaje post-fuego en el pastizal tropical de alta montaña. Volcán Iztaccíhuatl, México. *INTERCIENCIA*, 29(11), 604–611.
- Hall, D. K., Ormsby, J. P., Bindschadler, R. A., & Siddalingaiah, H. (1987). Characterization of snow and ice reflectance zones on glaciers using Landsat Thematic Mapper data. *Annals of Glaciology*, 9, 104–108.
- Hernández, B. de la T., Gaxiola-Castro, G., & Nájera-Martínez, S. (2004). Efectos del ENSO en la producción primaria frente a Baja California ENSO. *Ciencias Marinas*, 30(3), 427–441.
- IPCC. (2002). *Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico V del IPCC*. . <http://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2008.01186.x>
- IPCC. (2008). *El cambio climático y el agua. Documento técnico VI del IPCC*. Ginebra. 224 p.

- Lira, C. J. (2010). *Tratamiento digital de imágenes multispectrales*. (Instituto de Geofísica de la UNAM, Ed.) (Segunda Ed). México D. F. 605 p.
- Kääb, A., Huggel, C., Paul, F., Wessels, R., Raup, B., Kieffer, H., & Kargel, J. (2002). Glacier monitoring from aster imagery: accuracy and applications. *EARSeL eProceedings No. 2*, (2), 43–53.
- Kulkarni, A. V., Bahuguna, I. M., Rathore, B. P., Singh, S. K., Randhawa, S. S., Sood, R. K., & Dhar, S. (2007). Glacial retreat in Himalaya using Indian remote sensing satellite data. *Current Science*, 92(1), 69–74.
- Larraín, S. (2007). Glaciares chilenos: reservas estratégicas de agua dulce. *Revista Ambiente Y Desarrollo*, 23(3), 28–35.
- Larsen, C. F., Motyka, R. J., Arendt, A. A., Echelmeyer, K. A., & Geissler, P. E. (2007). Glacier changes in southeast Alaska and northwest British Columbia and contribution to sea level rise. *Journal of Geophysical Research*, 112, 1–11.
<http://doi.org/10.1029/2006JF000586>
- Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, LVII(3), 379–424.
- Martínez, J., Fernández, A., & Osnaya, P. (2004). *Cambio climático: una visión desde México*. (Instituto Nacional de Ecología, Ed.) (Primera Ed). México, D. F.

- Maturana, J., Bello, M., & Manley, M. (2004). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos En Chile. CONA, Chile, Valparaíso*, 13–27.
- Méndez, J. G., Návar, J. J. C., González, H. R., & Treviño, E. J. G. (2007). Teleconexiones del fenómeno ENSO a la precipitación mensual en México. *CIENCIA UANL*, X(3), 290–298.
- Méndez, G. J., Návar, C. J. de J., & González, O. V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920 - 2004) en México. *Investigaciones Geográficas, Mx(65)*, 38–55.
- Miranda, J. P., Delgado-Granados, H., Huggel, C., & Käab, A. (2007). Actividad eruptiva y cambios glaciares en el volcán Popocatepetl, México. *Boletín de Ecología*, 29(2), 153–163.
- Narama, C., Käab, A., Duishonakunov, M., & Abdrakhmatov, K. (2009). Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~1970), Landsat (~2000), and ALOS (~2007) satellite data. *Global and Planetary Change*, XXX, 1–13. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.08.002>
- Oerlemans, J. (1994). Quantifying global warming from the retreat of glaciers. *Science*, 264, 243–245.
- Paolini, J., Felipe, J. J., Sureda, B., & Rosales, J. (2012). Influencia del fenómeno El Niño - La Niña / Oscilación Sur (ENOS) y de la temperatura del Atlántico Norte en los caudales del Río Caura, Guayana Venezolana. *Revista Climatología*, 12, 23–32.

- Paul, F. (2000). Evaluation of different methods for glacier mapping using Landsat TM. *EARSeL eProceedings No. 1*, (1), 239–245.
- Paul, F., Huggel, C., Kääb, A., Kellenberger, T., & Maisch, M. (2002). Comparison of tm-derived glacier areas with higher resolution data sets. *EARSeL eProceedings No. 2*, (11-13), 15–21.
- Qinghua, Y., Shichang, K., Feng, C., & Jinghua, W. (2006). Monitoring glacier variations on Geladandong Mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote-sensing and GIS technologies. *Journal of Glaciology*, 52(179), 537–545.
- Raynal-Villaseñor, J. A. (2011). Cambio climático global: una realidad inequívoca. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XII(4), 421–427.
- Rivera, A., Casassa, G., Acuna, C., & Lange, H. (2000). Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Investig. Geogr. Chile*, 34, 29–60.
- Rivera, R. V., Vargas, E. P., Terrazas, S. D., & Gavi, F. R. (2002). Utilización de imágenes de satélite para determinar áreas con problemas de lixiviación de nitratos. *Revista Chapingo. Serie de Revistas Forestales y del Ambiente*, 8(1), 31–37.
- Rodionov, S. N. (2004). A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophysical Research Letters*, 31(L09204), 1–4.
<http://doi.org/10.1029/2004GL019448>

- Rodionov, S., & Overland, J. E. (2005). Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem. *ICES Journal of Marine Science*, 62, 328–332. <http://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.01.013>
- Rodríguez, S. R., González, I. M., & Hernández, J. L. M. (2006). Flujos de baja concentración asociados con lluvias de intensidad extraordinaria en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, LVIII(2), 223–236.
- Rodríguez, A. O. E., & Arredondo, B. H. A. (2005). *Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA, aplicado en estudios de ingeniería civil*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D. C.
- Sacristán, F. R. (2007). La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Scripta Ethno Logica*, XXIX, 79–90. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14802905>
- Seager, R., Kushnir, Y., Nakamura, J., Ting, M., & Naik, N. (2010). Northern Hemisphere winter snow anomalies: ENSO, NAO and the winter of 2009/10. *Geophysical Research Letters*, 37(L14703), 1–6. <http://doi.org/10.1029/2010GL043830>
- SEMARNAT. (2009). *Cambio climático ciencia, evidencia y acciones*. México, D. F. 84 p.
- SEMARNAT. (2013). *Programa de Manejo Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl* (Primera Edición). México, D. F. 185 p.

- Tanarro, G. L. M., Zamorano, O. J. J., & Palacios, E. D. (2004). Control de la deglaciación del volcán Popocatépetl (México) por fotogrametría como aplicación a la prevención de lahares. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, 99(1-4), 105–117.
- Timmermann, A., McGregor, S., & Fei-Fei, J. (2010). Wind effects on past and future regional sea level trends in the southern Indo-Pacific. *Journal of Climate*, 23(16), 4429–4437. <http://doi.org/10.1175/2010JCLI3519.1>
- Yarza, de la T. E. (2003). Los volcanes del Sistema Volcánico Transversal. *Investigaciones Geográficas*, 50, 220–234.
- Vega-López, A. A., & Alvarez, T. S. (1992). La Herpetofauna de los volcanes Popocatépetl e Iztaccíhuatl. *Acta Zoologica Mexicana*, 51, 128.
- Wolter, K., & Timlin, M. S. (1998). Measuring the strength of ENSO events: How does 1997/98 rank? *Weather*, 53(9), 315.324.

VII. ANEXOS

Anexo1. Resumen de imágenes multiespectrales utilizadas para la identificación glaciaria en los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Pico de Orizaba ubicados en el centro y occidente de la Faja Volcánica Transmexicana.

Popocatepetl		Iztaccíhuatl		Satélite & sensor	Pico de Orizaba		
Año	Fecha	Año	Fecha		Año	Fecha	Satélite
1985	*	1985	*	*	1984	23/12/1984	L5 (TM)
1985	31/01/1985	1985	31/01/1985	L5 (TM)	1985	*	*
1986	23/03/1986	1986	23/03/1986	L5 (TM)	1986	16/03/1986	L5 (TM)
1987	15/12/1987	1987	15/12/1987	L4 (TM)	1987	*	*
1989	07/03/1989	1989	07/03/1989	L4 (TM)	1989	26/10/1989	L4 (TM)
1990	18/03/1990	1990	18/03/1990	L5 (TM)	1990	*	*
1991	15/10/1991	1991	15/10/1991	L5 (TM)	1991	*	*
1991	*	1991	*	*	1992	08/09/1992	L5 (TM)
1993	22/02/1993	1993	22/02/1993	L5 (TM)	1993	19/03/1993	L5 (TM)
1994	29/03/1994	1994	29/03/1994	L5 (TM)	1994	22/03/1994	L5 (TM)
1995	12/02/1995	1995	12/02/1995	L5 (TM)	1995	12/05/1995	L5 (TM)
1996	18/03/1996	1996	18/03/1996	L5 (TM)	1996	27/03/1996	L5 (TM)
1997	05/03/1997	1997	05/03/1997	L5 (TM)	1997	15/04/1997	L5 (TM)

Popocatepetl		Iztaccíhuatl		Satélite & sensor	Pico de Orizaba		
Año	Fecha	Año	Fecha		Año	Fecha	Satélite
1998	04/02/1998	1998	04/02/1998	L5 (TM)	1998	17/03/1998	L5 (TM)
1999	12/04/1999	1999	12/04/1999	L5 (TM)	1999	20/03/1999	L5 (TM)
2000	29/03/2000	2000	29/03/2000	L5 (TM)	2000	23/04/2000	L5 (TM)
2001	17/04/2001	2001	17/04/2001	L5 (TM)	2001	17/03/2001	L7 (ETM+)
2002	06/01/2002	2002	06/01/2002	L7 (ETM+)	2002	01/12/2002	L7 (ETM+)
2003	17/05/2003	2003	17/05/2003	L7 (ETM+)	2003	10/05/2003	L7 (ETM+)
2007	25/09/2007	2007	25/09/2007	L5 (TM)	2007	*	*
2008	22/05/2008	2008	22/05/2008	L5 (TM)	2008	*	*
2009	02/02/2009	2009	17/04/2001	L5 (TM)	2009	12/12/2009	L5 (TM)
2010	05/02/2010	2010	05/02/2010	L5 (TM)	2010	*	*
2011	*	2011	*	*	2011	24/05/2011	L5 (TM)

L4 = satélite Landsat 4; L5 = satélite Landsat 5; L7 = satélite Landsat 7; TM = sensor Thematic Mapper y ETM+ = sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (* = años sin datos).