



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIOS GLACIOLÓGICOS EN EL VOLCAN IZTACCÍHUATL

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO GEOLOGO
P R E S E N T A :
MARCOS LUNA ALONSO



MEXICO, D. F.

OCTUBRE 2002

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

SR. MARCOS LUNA ALONSO

Presente

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-907

Dirección General de Bibliotecas  
a difundir en formato electrónico e impre.  
pendo de mi trabajo recepción

NOMBRE: Marcos Luna Alonso

FECHA: 21/10/02

CARRERA: Ingeniería

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Hugo Delgado Granados y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

### ESTUDIOS GLACIOLÓGICOS EN EL VOLCÁN IZTACCÍHUATL

- I INTRODUCCIÓN
- II GLACIOLOGÍA
- III ESTUDIOS DE DINÁMICA GLACIAL
- IV MONITOREO GLACIAL EN EL VOLCÁN IZTACCÍHUATL
- V RESULTADOS
- VI DISCUSIÓN  
CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

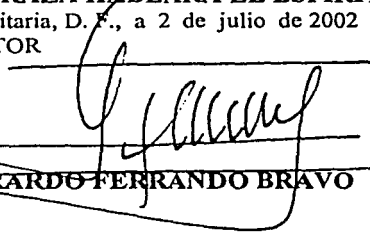
Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

Cd. Universitaria, D. F., a 2 de julio de 2002

EL DIRECTOR

  
ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB\*RLLR\*gtg



*Dedico esta tesis a mi abuelo Guillermo L.  
Que siempre me apoyo hasta el ultimo  
momento, en donde quiera que yo  
estaba, con su alma de montañista  
aunque nunca tuvo la oportunidad  
de serlo pero en mi se veía reflejado  
y creo que fui capaz de transmitirle  
esa emoción tan interna que solo las  
personas que conocen esos lugares en  
donde la tierra se une con el cielo, lo saben...*

Gracias

## Agradecimientos

---

Aunque esta es una parte difícil, porque se debe agradecer a todas las personas e instituciones tratando de no dejar de mencionar alguna, que de una forma u otra contribuyeron con su apoyo, consejos, comentarios, discusión, aliento e inclusive aquellas que obstaculizaron el camino, es necesario realizarla una vez concluido el trabajo.

Gracias a mi asesor, Dr. Hugo Delgado Granados, por su dirección, comentarios y esfuerzo implícito en las campañas realizadas para hacer posible la presente tesis y a cada uno de los miembros que revisaron el presente trabajo, Ing. Jorge Nieto Obregón por su tiempo, comentarios y consejos así como profesor y amigo, Ing. Claudia Rosales Mendoza por sus sugerencias y comentarios, Ing. Sergio Herrera Castañeda por sus observaciones y objetividad en sus comentarios, Dr. Gustavo Tolson Jones por sus críticas y recomendaciones, en general a los valiosos consejos y comentarios gracias a los cuales el presente trabajo mejoro.

Agradezco el apoyo económico que se me brindo durante la realización de mis estudios y la presente tesis, a DGAPA (IN-121201) y a CONACYT (proyecto 32527-T) por el apoyo para esta investigación, que es parte de una serie de trabajos de investigación para la actualización del inventario glacial de México, así como a CENAPRED y CFE por el apoyo logístico, (helicóptero entre otros recursos) y a los miembros de la Asociación de Montañismo y Exploración de la UNAM por su abnegada participación directa con su gente siempre dispuesta y entusiasta e indirectamente con sus enseñanzas y escuela de primer nivel que me ha proporcionado muchas satisfacciones y ha permitido la realización de muchos logros y metas como estudiante, montañista e investigador.

Deseo agradecer también a todas las personas como Lucio, Lencho, Pancho Fco., Iván, Efrén, HDG, el dhillón, Enrique, etc., tratando de no olvidar mencionar alguna que iniciaron todo este trabajo de instalación de las estacas en los diferentes glaciares de los principales volcanes de México, ya que esta tesis es seguimiento de lo que ellos iniciaron y aquellos que aun siguen colaborando.

Gracias a Enrique Cabral y Francisco Correa por el procesamiento y aportación de los datos de las mediciones de GPS; a su amistad, buenas enseñanzas y las mediciones de distaciómetro realizadas por Adalberto Díaz Vera; a los datos climatológicos provenientes de la tesis de Susana Ortega del Valle, y demás.

Especiales agradecimientos a Lucio Cárdenas por sus enseñanzas, indicaciones, cuidados y ayuda brindada con sus excelentes conocimientos de la montaña y climatológicos, sobretodo como compañero montañista y amigo en los buenos y malos ratos pasados que es cuando realmente se conoce a las personas.

Gracias de igual manera a Paty Julio y Lilia Arana por su apoyo sentimental, académico, orientación y aporte de información, ya que son compañeras de males en este tipo de empresas poco comprendida y por lo mismo obstaculizada de cierta manera, en la cual de una u otra forma estamos o estuvimos involucrados y sobretodo en los momento de incertidumbre y desesperación.

Muchas gracias al Inge. Isaac Abimelec por todo su apoyo en la enseñanza y el manejo de paquetería, asesorías en los momentos de mas necesidad y mas que nada como amigo y compañero.

Muchas Gracias a mi abuela Bertha Estela, a mi madre Ma. Dolores, a mis tíos Estela y Saúl, Ruben, Lety, Rebeca, Raymundo, Fernando, Alicia y a mi familia en general por el apoyo brindado durante todos estos años.

También quisiera mencionar mi gratitud a una persona muy especial para mí Lía C. que me apoyo de ultimo momento en la etapa final, que es la parte más difícil del trabajo con su cariño, compañía y tranquilidad transmitida para la culminación de este trabajo.

Antes de terminar quisiera dedicar parte de este trabajo a Fermín, un buen amigo y compañero, que recordare con admiración y cariño, ya que siempre me contagio con su entusiasmo aportándome grandes cosas en su dedicación durante la carrera y fuera de ella.

*A mis amigos, compañeros, maestros que son muchos y tendría que escribir muchas hojas mas para poder mencionar a todos ellos y todo lo que quisiera decir sobre lo que me han brindado y siento de cada uno:*

Oscar Mendoza, Eduardo Abarca, Jaime García, Gerardo, Ulises, Memo, Carlos Linares, Alberto Huesca, Dimitri, Ester Romero, Ivonne, Beatriz Oropeza, Gavilanes, Estela, Roció, Efrén Reynoso, Lorenzo Ortiz, Adrián Farfán, Boss, Israel Correa, Ismael, Bety, Iván Rivero, Ricardo Constante, Héctor Escalona, Yardenia Martínez, Fermín Morales, Benjamín Domínguez, Cesarín, Wendy Vanesa Morales, José Luis, Juan Carlos, Giovanni Sosa, Miriam Osorio, Mike, Carlitos, Maricarmen, Nubia, Darío, Rubén, Raúl, Gaby, Edit, Víctor, Luz, Donovan, Angélica, Ing. Alfredo Victoria, Marquez, etc, etc, etc.

Y si alguno no aparece, no se preocupen que ustedes ya lo saben,

**Gracias.**

## Resumen

---

En el presente estudio se emplearon métodos geodésicos en combinación con los glaciológicos, en ambos casos se requirió trabajo directo en el campo (nivelación de estacas, cartografía glacial, toma de datos meteorológicos, perforación, etc.). Estos métodos han sido utilizados en forma exitosa en el estudio de diversos aspectos de los glaciares: detección de cambios morfológicos en la superficie del glaciar, estimación del balance de masa y tasas de movimiento.

Las variaciones que presenta la geometría de los glaciares pueden cuantificarse, particularmente con la velocidad y tasa de movimiento glaciar en el Iztaccíhuatl, con el objeto de establecer el comportamiento de éstos a mediano y largo plazo. Estas variaciones tienen relación directa con el clima regional y mundial, sin embargo en el caso que nos ocupa, debe considerarse el posible impacto en el clima regional de una ciudad de las dimensiones de la Ciudad de México y viceversa.

Los datos obtenidos de las estacas correspondientes al 4 de mayo y 29 de noviembre de 1998 muestran una tendencia de retroceso y por lo que se puede observar un balance negativo por el poco desplazamiento que han presentado los puntos (estacas) situados en el glaciar durante este periodo. La componente de movimiento absoluto mayor registrado fue de 4046.420 mm y la tasa de movimiento absoluto de 19.361 mm/día, se presenta un movimiento significativo en este punto (IZ30) y se está desplazando hacia el SW con una componente mayor de 4 m. Con respecto a los demás puntos (IZ00, IZ10, IZ20, IZ31), se observa que prácticamente no tienen movimiento.

La comparación de la diferencia de altitud respecto al error analítico, muestran una diferencia menor de apenas 0.895 m, los demás puntos presentan una diferencia mayor al error analítico, que interpretando, la disminución (ablación) del glaciar en dichos puntos es significativa con una componente de entre 1 y 2 m.

La estimación del área que limitan las estacas ubicadas en el glaciar de Ayoloco de aproximadamente  $11,110.01 \text{ m}^2$  y el volumen calculado que se ha perdido por ablación es de  $17,687.13 \text{ m}^3$ , se puede apreciar que en este periodo en el que se realizaron las mediciones que la disminución es fuerte en promedio de 1.6 m, aunque no es representativa porque solo se trata de una pequeña parte del glaciar, sin embargo nos proporciona un parámetro de cómo realmente los glaciares están siendo afectados por diversos factores.

El área glaciada actual del volcán Iztaccíhuatl ha sido modificada en forma sustancial. En particular, los glaciares que se encuentran en las laderas se han adelgazado y reducido de manera notable e inclusive desaparecido, de manera que se pueden considerar como glaciares en un franco proceso de extinción, de ahí la importancia de su estudio y reconocimiento.

La tendencia de aumento gradual de la temperatura, combinada con la disminución de la precipitación, es junto con otros factores, las responsables de las modificaciones del tamaño de los glaciares, pues estos revelan ser vulnerables al cambio climático.

En general, la respuesta que tiene los glaciares, ante las condiciones climáticas y posiblemente la afectación de la actividad volcánica por su cercanía con el volcán Popocatepetl, ha sido la pérdida de movimiento, adelgazamiento y fusión desigual de la masa glaciar.



# INDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I. INTRODUCCIÓN.</b>  | <b>1</b>  |
| <b>I.1. ANTECEDENTES.</b>  | <b>1</b>  |
| <b>I.2. TRABAJOS PREVIOS.</b>  | <b>2</b>  |
| <b>I.3. OBJETIVOS.</b>   | <b>4</b>  |
| <b>I.4. LOCALIZACIÓN Y ACCESO.</b>   | <b>5</b>  |
| <b>II. GLACIOLOGÍA.</b>  | <b>8</b>  |
| <b>II.1. DEFINICIÓN DE GLACIAR.</b>  | <b>9</b>  |
| II.1.1. ¿QUÉ ES UN GLACIAR?  | 9         |
| II.1.2. ¿QUÉ NO ES UN GLACIAR?   | 10        |
| II.1.3. DISTRIBUCIÓN GLOBAL DE GLACIARES.  | 11        |
| <b>II.2. PARTES DE UN GLACIAR.</b>   | <b>12</b> |
| II.2.1. ZONAS GLACIADAS.   | 12        |
| II.2.2. ZONA DE ACUMULACIÓN.   | 14        |
| II.2.3. ZONA DE ABLACIÓN.  | 16        |
| II.2.4. ZONA DE NIEVE MOJADA.  | 17        |
| II.2.5. LÍNEA DE EQUILIBRIO.   | 18        |
| II.2.6. LÍNEA DE LAS NIEVES.   | 19        |
| <b>II.3. RÉGIMEN GLACIAL.</b>  | <b>20</b> |
| II.3.1. AVANCE Y RETROCESO.  | 20        |
| <b>II.4. DINÁMICA GLACIAL.</b>   | <b>22</b> |
| II.4.1. FÍSICA DE GLACIARES.   | 24        |
| II.4.2. BALANCE DE MASA.   | 32        |
| <b>II.5. CLASIFICACIÓN DE GLACIARES.</b>   | <b>34</b> |
| II.5.1. CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA.   | 34        |
| II.5.2. CLASIFICACIÓN TÉRMICA.   | 38        |
| II.5.3. CLASIFICACIÓN DINÁMICA.  | 39        |
| <b>II.6. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LOS GLACIARES Y DE LAS FORMAS QUE RESULTAN DE SU ACTIVIDAD.</b> | <b>41</b> |
| II.6.1. GRIETAS.   | 41        |
| II.6.2. MORRENAS.  | 43        |
| II.6.3. OJIVAS.  | 45        |
| II.6.4. OTRAS FORMAS Y ESTRUCTURAS GLACIALES.  | 46        |
| <b>III. ESTUDIOS DE DINAMICA GLACIAL</b>   | <b>49</b> |
| <b>III.1. INSTALACIÓN DE ESTACAS.</b>  | <b>49</b> |
| <b>III.2. MÉTODOS GEODÉSICOS.</b>  | <b>55</b> |
| <b>III.3. MONITOREO GLACIAL.</b>   | <b>64</b> |
| <b>III.4. PROCESAMIENTO DE DATOS GEODÉSICOS.</b>   | <b>66</b> |
| III.4.1. CÁLCULO DE LAS VARIABLES EN LAS MEDICIONES DE MOVIMIENTO DE ESTACAS.                            | 68        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>IV. MONITOREO GLACIAL EN EL VOLCAN IZTACCIHUATL.</b>                | <b>72</b>  |
| IV.1. LOS GLACIARES DEL IZTACCÍHUATL.                                  | 72         |
| IV.2. LOGÍSTICA.   | 81         |
| IV.3. TRABAJO DE CAMPO.  | 84         |
| IV.4. INSTALACIÓN DE ESTACAS.  | 91         |
| IV.5. MONITOREO.   | 94         |
| IV.6. PATRONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN EL ÁREA CIRCUNVECINA. | 98         |
| <b>V. RESULTADOS.</b>  | <b>104</b> |
| <b>VI. DISCUSIÓN.</b>  | <b>119</b> |
| <b>VII. CONCLUSIONES.</b>  | <b>120</b> |
| <b>REFERENCIAS.</b>  | <b>122</b> |

**APÉNDICE I.**  
TABLAS DE DATOS DE CAMPO

**APÉNDICE II.**  
TABLAS DE DATOS DE GABINETE

**APÉNDICE III.**  
TABLAS DE DATOS DE MEDICIÓN DE ESTACAS

**APÉNDICE IV.**  
DATOS DE MOVIMIENTO DE ESTACAS

**APÉNDICE V.**  
DATOS DE ESTIMACIÓN DEL ERROR ANALÍTICO

**APÉNDICE VI.**  
DATOS DEL CALCULO DE ERRORES DE MEDICIÓN

**APÉNDICE VII.**  
RESUMEN DE RESULTADOS Y GRÁFICAS

**APÉNDICE VIII.**  
MODELOS DE LOS GLACIARES

## Lista de Figuras.

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Localización y acceso del volcán Iztaccíhuatl.                                     | 7  |
| Figura 2. Etapas de transformación de nieve a hielo.   | 8  |
| Figura 3. Distribución de los glaciares a nivel global.                                      | 11 |
| Figura 4. Grafica de la distribución global del hielo que cubre la superficie de la tierra.  | 12 |
| Figura 5. Esquema de las principales zonas de un glaciar.                                    | 13 |
| Figura 6. Esquema de las diferentes áreas de acumulación y sus subzonas.                     | 14 |
| Figura 7. Ilustración de seracs inestables.  | 16 |
| Figura 8. Vista de las áreas de acumulación del glaciar en las montañas San Elías en Canadá. | 18 |
| Figura 9. Áreas y límites de las zonas de un glaciar.  | 19 |
| Figura 10. Tipos de grietas en glaciares de valle.   | 42 |
| Figura 11. Estructuras bandeadas de ojivas en los glaciares.                                 | 45 |
| Figura 12. Formas y estructuras glaciales.   | 48 |
| Figura 13. Perforadora de punta caliente.  | 52 |
| Figura 14. Perforadora helicoidal de tipo manual.  | 54 |
| Figura 15. Teodolito electrónico Sokkia DT5.   | 57 |
| Figura 16. Distanciómetro Red2LV.  | 58 |
| Figura 17. Vista aérea del volcán Iztaccíhuatl.  | 72 |
| Figura 18. Modelo digital de elevación del volcán Iztaccíhuatl.                              | 73 |
| Figura 19. Glaciar del Cuello.   | 74 |
| Figura 20. Glaciar de Ayolotepito.   | 75 |
| Figura 21. Glaciar Nororiental.  | 76 |
| Figura 22. Glaciar del Pecho.  | 76 |
| Figura 23. Glaciar Centro-Oriental.  | 77 |
| Figura 24. Glaciar de Ayoloco.   | 78 |
| Figura 25. Glaciar Sudoriental.  | 78 |
| Figura 26. Glaciar de Atzintli.  | 79 |
| Figura 27. Glaciar de San Agustín.   | 80 |
| Figura 28. Localización de las estaciones IZAG e IZCR.                                       | 84 |
| Figura 29. Modelo digital en donde se observa el límite del glaciar de Ayoloco.              | 85 |
| Figura 30. Localización de las estacas en el glaciar de Ayoloco.                             | 87 |
| Figura 31. Transporte de material y personas.  | 92 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 32. Ubicación de las estaciones y estacas en el Sistema de La Panza.   | 93  |
| Figura 33. Gráficas de precipitación y temperatura, estación Río Frio.  | 99  |
| Figura 34. Gráficas de precipitación y temperatura, estación San Rafael<br>Tlalmanalco.   | 99  |
| Figura 35. Gráficas de precipitación y temperatura, estación Amecameca.   | 100 |
| Figura 36. Gráficas de precipitación y temperatura, estación Huejotzingo.   | 101 |
| Figura 37. Gráficas de precipitación y temperatura del área circundante<br>del volcán Iztaccíhuatl.   | 103 |
| Figura 38. Gráfica de ubicación de estacas en el volcán Iztaccíhuatl en<br>coordenadas UTM para mayo – noviembre.   | 104 |
| Figura 39. Gráfica de las componentes de movimiento absoluto.   | 105 |
| Figura 40. Gráfica de magnitud y desplazamiento del punto IZ30.   | 106 |
| Figura 41. Mapa del área limitada por las estacas en el glaciar.  | 109 |
| Figura 42. Patrones de grietas, pared y placas de hielo que se forman en<br>el Glaciar de Ayoloco.  | 110 |
| Figura 43. Rimaya (grieta) que se forma por el movimiento del Glaciar<br>de Ayoloco.  | 110 |
| Figura 44. Croquis en donde se observa la carga que ejerce el glaciar, la<br>influencia de la pendiente y las grietas en el desplazamiento<br>de las estacas. | 114 |
| Figura 45. Mapa en donde se observa la franja propuesta que delimita a los<br>glaciares.  | 116 |
| <i>Apéndice VII.</i>  |     |
| Figura 46. Gráficas de Distancia contra tiempo.   |     |
| Figura 47. Gráficas de altitud contra tiempo.   |     |
| <i>Apéndice VIII.</i>   |     |
| Figura 48. Modelo digital en donde se observa la delimitación de los glaciares<br>propuesta por Lorenzo en 1964.  |     |
| Figura 49. Modelo digital en donde se observa la localización de las estacas<br>y estaciones en el sistema de La Panza.                                       |     |
| Figura 50. Modelo digital del glaciar de Ayoloco vista desde el Oeste.  |     |
| Figura 51. Modelo digital del glaciar de Ayoloco visto desde el Este.   |     |
| Figura 52. Modelo digital del glaciar de Ayoloco visto desde el Norte.  |     |
| Figura 53. Modelo digital del glaciar de Ayoloco visto desde el Sur.  |     |

## **Lista de Tablas.**

---

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1. Clasificación de los glaciares del volcán Iztaccíhuatl. | 81  |
| Tabla 2. Ejemplo de bitácora de medición.                        | 90  |
| Tabla 3. Tasa de movimiento.                                     | 105 |
| Tabla 4. Datos de área y volumen calculados.                     | 108 |

### *Apéndice I.*

|  |  |
|--|--|
| Tabla 5. Datos de campo del 4 de mayo de 1998.       |  |
| Tabla 6. Datos de campo del 29 de noviembre de 1998. |  |

### *Apéndice II.*

|   |  |
|---|--|
| Tabla 7. Datos de gabinete del 4 de mayo de 1998.       |  |
| Tabla 8. Datos de gabinete del 29 de noviembre de 1998. |  |

### *Apéndice III.*

|  |  |
|--|--|
| Tabla 9. Medición de estacas en el volcán Iztaccíhuatl.    |  |
| Tabla 10. Movimiento de estacas en el volcán Iztaccíhuatl. |  |

### *Apéndice IV.*

|  |  |
|--|--|
| Tabla 11. Resumen de datos de movimiento de estacas en el volcán Iztaccíhuatl. |  |
|--|--|

### *Apéndice V.*

|  |  |
|--|--|
| Tabla 12. Estimación del error analítico.  |  |
| 1) Ángulos en gones.                       |  |
| 2) Ángulos en grados.                      |  |
| 3) Transformación de ángulos a distancias. |  |

### *Apéndice VI.*

|   |  |
|---|--|
| Tabla 13. Datos del calculo de los errores. |  |
| A) Calculo de errores de medición.          |  |
| B) Estimación de precisión a priori.        |  |

### *Apéndice VII.*

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Tabla 14. Resumen de resultados. |  |
|----------------------------------|--|

## **I. INTRODUCCIÓN.**

El volcán Iztaccíhuatl, nombre de origen náhuatl que significa Mujer Blanca (*Iztac* - blanco y *cihuatl* - mujer), es conocido como la "Mujer Dormida" debido a la caprichosa forma que adquieren el conjunto de edificios volcánicos. Está situado en la parte oriental de la Cuenca de México, constituyéndose como parte del límite entre los estados de México y Puebla. Sus cumbres están cubiertas de hielo durante todo el año.

### ***1.1. Antecedentes.***

Los glaciares son masas de hielo que se mueven y que aparecen en las altas montañas tropicales y también ocurren en zonas templadas. Los glaciares tienen un régimen de alimentación y pérdida de nieve y hielo, la diferencia entre ganancia y pérdida se denomina balance de masa, si es positivo significa que el glaciar avanza y si es negativo retrocede. La determinación cuantitativa de pérdida y ganancia es útil para establecer la magnitud y tendencia de los cambios (Benn y Evans, 1998).

Los glaciares se preservan en los lugares donde las condiciones climáticas y topográficas permiten que las entradas excedan o se equilibren con las pérdidas. Por otra parte, los glaciares son muy sensibles a los cambios climáticos; aumentan o disminuyen su tamaño en respuesta a los cambios de temperatura y precipitación, por lo que sus fluctuaciones son una fuente valiosa de información sobre el clima regional y global (Benn y Evans, 1998).

Los métodos para estudiar los cambios que se producen en los glaciares son diversos. Pueden emplearse métodos geodésicos en combinación con los glaciológicos, en ambos casos se requiere trabajo directo en el campo (nivelación de estacas, cartografía glacial, toma de datos meteorológicos, perforación, etc.). Estos métodos han sido utilizados en forma exitosa en el estudio de diversos

aspectos de los glaciares: detección de cambios morfológicos en la superficie del glaciar, estimación del balance de masa y tasas de movimiento.

Lo característico del volcán Iztaccíhuatl es su cima nevada. La existencia de sus áreas glaciadas está directamente relacionada con su altitud (Sharp, 1988). En el siglo XX los glaciares mexicanos, en general, sufrieron un estancamiento o reducción en el área cubierta por nieve y hielo, mostrando una clara tendencia de retroceso, la cual se ha atribuido a factores climáticos regionales y/o globales (Delgado, 1993). Las causas de esta reducción aún están siendo evaluadas, sin embargo, el estudio de las áreas glaciadas de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl ha adquirido mayor relevancia por la actividad eruptiva del primero.

Las variaciones que presenta la geometría de los glaciares pueden cuantificarse, particularmente con la velocidad y tasa de movimiento glaciar en el Iztaccíhuatl, con el objeto de establecer el comportamiento de éstos a mediano y largo plazo. Estas variaciones tienen relación directa con el clima regional y mundial, sin embargo en el caso que nos ocupa, debe considerarse el posible impacto en el clima regional de una ciudad de las dimensiones de la Ciudad de México y viceversa.

## ***1.2. Trabajos previos.***

En el Iztaccíhuatl, el estudio de las glaciaciones y la actividad de los glaciares modernos, son las referencias más antiguas.

Entre 1781 y 1789, el sacerdote José Antonio de Alzate y Ramírez realizó observaciones barométricas en el extremo de uno de los glaciares, que no especifica de que glaciar se trata, ya que aun no existía interés científico por los mismos, obteniendo una lectura de 4,633 msnm (Alzate 1831, citado por Lorenzo en 1964). Posteriormente, hasta 1890, no existen menciones acerca de los glaciares del Iztaccíhuatl.

Los glaciares fueron observados por primera vez por un viajero alemán, Angelo Heilprim en 1890; pero los primeros estudios formales fueron realizados por Ordóñez en 1893 (citado por Blázquez en 1961) refiriéndose principalmente al retroceso de la masa glaciaria. Ordóñez (1894) realizó observaciones sobre el Iztaccíhuatl, en donde reconoce características de los glaciares de Ayolotepito y Ayoloco, calificándolos como glaciares suspendidos.

Gilchrist en 1907 (citado por Lorenzo en 1964), llevó a cabo una ascensión, según sus notas, por el glaciar de Ayoloco en donde toma fotografías de una cueva de hielo situada en la lengua del glaciar.

En 1908, la Compañía Papelera de San Rafael (citado por Guillén en 1996), realizó observaciones acerca de la actividad del glaciar de Ayolotepito, el cual tuvo un desagüe muy rápido en diciembre de 1908, provocando una inundación que dañó a la empresa.

Freundenberg en 1911 (citado por Lorenzo en 1964), hace la descripción fisiográfica del lado occidental del Iztaccíhuatl, mencionando el glaciar que llaman Atzintli, además de los ya reconocidos por Ordóñez y es el primero en señalar la existencia de glaciares en el lado este.

White (1962) publica un trabajo sobre los glaciares de México, menciona que los depósitos glaciales más antiguos, en el lado oeste del volcán, llegaron a alcanzar los 2450 msnm, lo que implica un área considerable bajo la influencia de glaciación. También presenta un mapa con los límites de los depósitos glaciales adjudicados a la última glaciación del Pleistoceno Tardío, donde se muestra el retroceso de los glaciares.

Lorenzo (1964) menciona en su libro "Los glaciares de México", a diferentes autores como Farrington (1897), Bøese (1901), Robles Ramos (1944) y otros



varios que escribieron sobre el Iztaccíhuatl pero sus aportaciones no son mayores. Lorenzo realiza el primer inventario de los glaciares del Iztaccíhuatl, donde establece sus características particulares, posición y extensión, también menciona que el Iztaccíhuatl es la tercer montaña mas alta del país y que existen referencias de los glaciares del Iztaccíhuatl desde 1781. Aunque no menciona el área total de las zonas cubiertas por nieve en trabajos anteriores a éste, habla que en el pasado pudo haber existido una masa glacial más grande de la que él reporta y que debió cubrir al volcán por completo.

Asimismo, Lorenzo (1964) aborda el estudio de las condiciones periglaciales de las altas montañas de México, mencionando que el total aproximado de las áreas cubiertas por hielo es: Pico de Orizaba 9.50 km<sup>2</sup>, Popocatepetl 0.72 km<sup>2</sup> e Iztaccíhuatl 1.21 km<sup>2</sup>.

Guillén (1996) cita que Blázquez calculó los espesores medios de nieve y hielo (Ayolotepito: 3 y 4 m; Ayoloco: 3 y 8 m, respectivamente) y los volúmenes de nieve y hielo (Ayolotepito: 2,130 y 2,840 x10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>; Ayoloco: 2,772 y 7,392 x10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>, respectivamente) en las cumbres del Iztaccíhuatl, y concluye que el límite de las nieves no tiene una frontera fija a esas altitudes, mientras que los mantos de hielo tienen un limite inferior relativamente estable.

### ***1.3. Objetivos.***

Objetivo general

Aportar información que permita entender la dinámica glacial del volcán Iztaccíhuatl.

## Objetivos específicos.

Implementar técnicas geodésicas, topográficas y glaciológicas para la estimación del movimiento del glaciar de La Panza.

Determinar las componentes de movimiento absoluto del glaciar de La Panza con base en los datos obtenidos en campo para diferentes fechas de medición realizadas en 1998.

Determinar las tasas de movimiento del glaciar de La Panza con base en los datos obtenidos en campo para las diferentes fechas de medición realizadas en 1998.

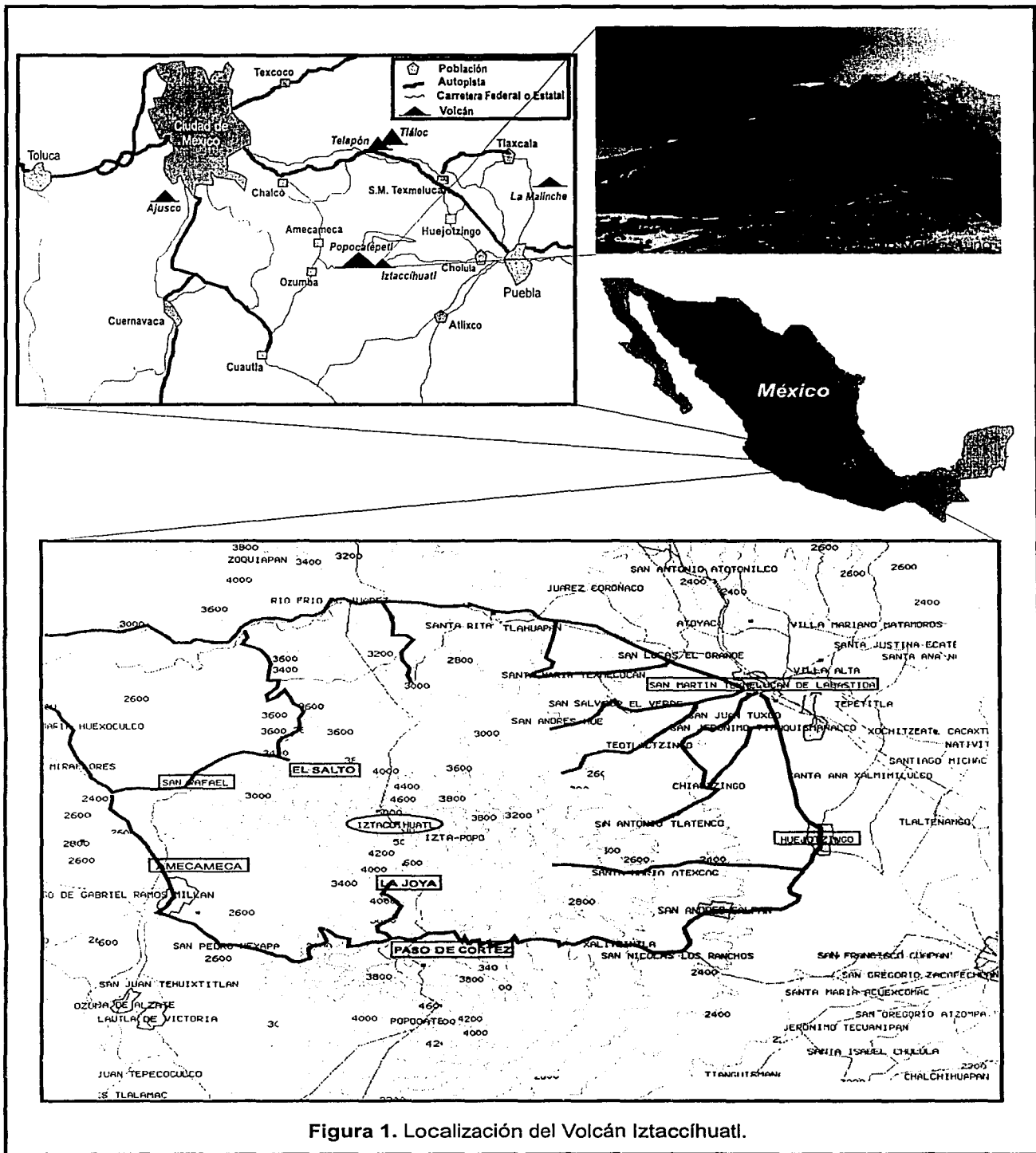
### ***1.4. Localización y acceso.***

Entre todos los volcanes de la Faja Volcánica Transmexicana, el Iztaccihuatl es uno de los que conservan áreas cubiertas por glaciares. Su cumbre mayor está situada en las coordenadas: 19°11' de latitud Norte y 98°39' de longitud Oeste, aproximadamente a 60 km al SE de la ciudad de México. Con una altitud de 5,286 msnm es la tercera cumbre de México.

Se puede llegar a la zona este desde la ciudad de México por la carretera México – Puebla, luego, desde San Martín Texmelucan o Huejotzingo existen brechas que suben por las laderas hasta cotas elevadas. Para llegar por el lado sur, la vía de acceso empleada desde la capital, se inicia por la carretera México – Puebla, en el kilómetro 19 se toma la desviación a Cuautla. 2 Km después de Amecameca se toma la desviación hacia el E y a 23 kilómetros se encuentra Paso de Cortés, ahí se toma el camino que se dirige al norte, pasando por la estación Atzomoni hasta alcanzar el paraje de La Joya (a 7.8 km de Paso de Cortés y a una altitud aproximada de 4,080 m). Desde allí se pueden tomar veredas que

conducen al lado suroriental o al occidental, desde donde se comienzan las ascensiones a la cumbre.

Si se quiere llegar a la montaña por el lado oeste, que es la más común para los habitantes de la Ciudad de México, se toma el mismo camino que conduce por el lado sur del volcán; si se quiere llegar por la parte norte u occidental, al llegar a Tlalmanalco se toma la desviación hacia San Rafael, desde allí existen caminos para los vehículos de doble tracción que pueden subir hasta la cota de 3,700 m, y de ellos, el que más llega rumbo al sur termina en el paraje llamado El Salto (Figura 1).



## II. GLACIOLOGÍA.

La glaciología es una ciencia cuyo campo de estudio es muy extenso. Antes de abordar los aspectos referentes al tema, es pertinente mencionar el significado de varios conceptos como nieve, congesta y hielo.

Nieve, es el material precipitado desde una nube condensada, que no cambia desde su caída sobre la superficie glacial, su densidad varía entre 50 y 200  $\text{kg/m}^3$ , su porosidad es muy alta, de textura suave y esponjosa propia de la nieve fresca, forma cristales cúbicos y hexagonales de color blanco (Paterson, 1994) (Figura 2).

Congesta o neviza, se refiere a nieve mojada o húmeda que ha sobrevivido a la estación de ablación y ha iniciado su transformación a hielo, su densidad varía entre 400 y 830  $\text{kg/m}^3$  (Paterson, 1994) (Figura 2).

Hielo, es el estado final del proceso de transformación y ocurre cuando los pasajes de aire interconectados entre los granos o cristales de hielo son cerrados. En el hielo glacial el aire está presente sólo como burbujas y cualquier incremento en la densidad resulta a partir de la compresión de éstas. La densidad del hielo, es mayor a 830  $\text{kg/m}^3$ , y la máxima densidad que puede alcanzar es cercana a los 910  $\text{kg/m}^3$  (Figura 2).

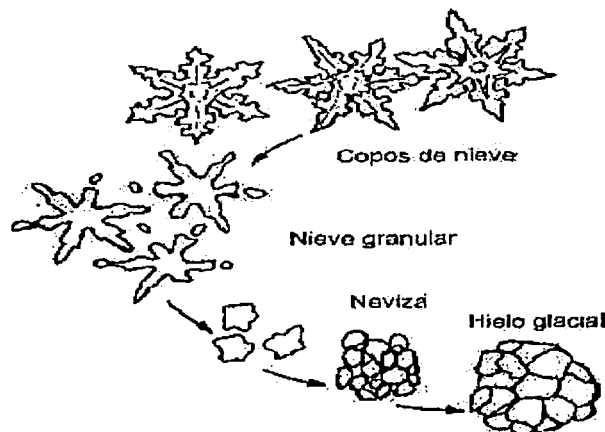


Figura 2. Muestra las etapas de transformación de nieve a hielo.

## ***II.1. Definición de glaciar.***

Los glaciares son masas de hielo formadas por la acumulación de la nieve, que bajo la influencia de la gravedad, se desplazan a partir de los campos de nieve de la cuenca de alimentación donde se originan (Holmes, 1980).

De acuerdo con Robinson (1990), es una masa de hielo y, como cualquier otra masa (de rocas o suelo) sobre la superficie de la tierra, se mueve cuesta abajo. Los glaciares son masas de hielo sobre el terreno que muestran evidencia de movimiento o que ha tenido movimiento.

Es un cuerpo natural de hielo, originado en el terreno y donde el movimiento corriente abajo transporta el hielo a partir de un área de acumulación hasta un área de emplazamiento (Holmes, 1980).

### ***II.1.1. ¿Qué es un glaciar?***

Los glaciares son masas de hielo que se caracterizan por tener una dinámica de acumulación, transporte y metamorfismo que se incrementan debido a la acumulación de nieve y hielo que se va apilando sobre su superficie y pierden masa por ablación (Menzies, 1995).

Los glaciares son entes dinámicos asociados a la acumulación de la nieve de un año a otro, transportación y depósito del hielo. La transportación es una función crítica. Las masas de hielo son susceptibles a moverse, en parte por los mecanismos de movimiento internos, que es una cualidad de los glaciares (Menzies, 1995).

Se puede visualizar a los glaciares como un sistema, con entradas y salidas, e interacción con otros sistemas, como la atmósfera, los océanos, los ríos

y el paisaje (Benn y Evans, 1998). La masa y energía potencial son las formas de entrada al sistema, que puede ser por medio de vapor de agua, agua, hielo, escombros de rocas y calor. La masa y energía potencial son transferidas a través de una variedad de formas, interviniendo periodos en donde se adicionan al glaciar y quedan almacenadas en conjunto o independientemente debajo del glaciar. Los hielos glaciales son reconocidos como un tipo de roca, una que cubre una fracción de la superficie terrestre como cualquier otra especie de roca (Sharp, 1988).

### ***II.1.2. ¿Qué no es un glaciar?***

No todas las masas de hielo tienen un origen natural y están asociadas con la tierra y los glaciares. Un bloque de hielo que se rompe a partir de un campo de hielo y se corre hacia abajo por una ladera de montaña es una masa de hielo que se mueve, pero esto no es un glaciar.

Cuerpos de hielo en la tierra son formados por el congelamiento de la superficie del agua dentro de la tierra congelada pero que no son glaciares, ni tampoco el hielo en el mar ártico y océano antártico.

El hielo en el mar es formado en capas relativamente delgadas sobre la superficie del océano, principalmente por el congelamiento del agua del mar. El hielo en el mar puede estar contenido en islas de hielo a la deriva de hasta 100 metros de espesor que tienen su separación a partir de placas de hielo sobre tierra, pero este hielo en el mar no es calificado como glaciar. Aunque los glaciares en el continente antártico están sepultados bajo 2,800 metros de hielo, éstos no son verdaderos glaciares, la gran parte del Polo Norte, sólo se trata de hielo en el mar que flota en el océano ártico (Sharp, 1988).

Algunos cuerpos de hielo se reducen a placas de nieve persistentes, capaces de adquirir propiedades que las relacionan con el fenómeno glacial más que con un fenómeno simplemente nival, éstos son los llamados *neveros*.

### II.1.3. Distribución global de glaciares.

Aunque el hielo es la más extensamente distribuida de todas las rocas sobre la superficie de la Tierra ( $511,200,000 \text{ km}^2$ ), éste sólo cubre cerca del 3.1 por ciento del globo terrestre ( $15,847,000 \text{ km}^2$ ). Actualmente, el hielo se extiende en el mar cubriendo 7.3 por ciento de los océanos y el volumen total de hielo que existe en los glaciares es de aproximadamente 33 millones de  $\text{km}^3$ , que constituyen menos del 2 por ciento del agua del planeta. Durante la pasada edad de hielo, los glaciares cubrían cerca del 32 por ciento de la Tierra, aproximadamente  $163,584,000 \text{ km}^2$ . La fusión del hielo de la última edad glacial provocó que el nivel del mar ascendiera alrededor del mundo y cambiara de 100 a 140 metros. Si el hielo existente en la Tierra se fundiera, elevaría el nivel del mar cerca de 70 metros alrededor del mundo (Sharp, 1988).

El hielo de los glaciares actualmente cubre aproximadamente el 10 por ciento de los casi 16 millones de  $\text{km}^2$  que cubren la superficie de la Tierra, muchos de los cuales están contenidos en las capas de hielo de la Antártida ( $13.5$  millones  $\text{km}^2$ ) y Groelandia ( $2$  millones de  $\text{km}^2$ ). El restante 3 por ciento o  $500,000 \text{ km}^2$  existe en capas de hielo y pequeños glaciares localizados en altas latitudes o en regiones montañosas alrededor del mundo. Estas áreas se localizan predominantemente en el hemisferio norte, específicamente alrededor de la cuenca del océano Ártico, en localidades marítimas como Noruega, Alaska y los Andes y, tierra adentro, en los terrenos de altas montañas como los Alpes y los Himalaya (Benn y Evans, 1998) (Figura 3).

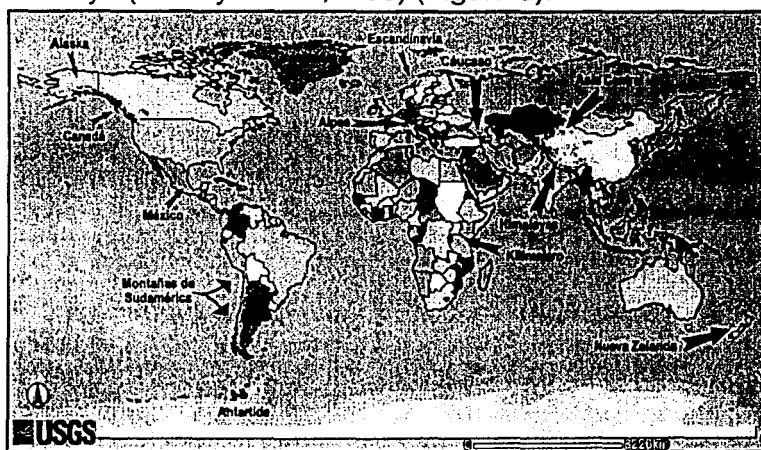


Figura 3. Distribución de los glaciares a nivel global.



Los hielos existentes principalmente como corrientes, se distribuyen de la manera siguiente: los Alpes tienen cerca de 2,900 km<sup>2</sup>, Escandinavia 3,100 km<sup>2</sup>, Alaska 74,700 km<sup>2</sup>, partes de Canadá 25,000 km<sup>2</sup>, el Cáucaso 1,800 km<sup>2</sup> y los Himalaya 33,000 km<sup>2</sup>. Las montañas de Sudamérica tienen cerca de 36,000 km<sup>2</sup> de hielo, Nueva Zelanda cerca de 1,000 km<sup>2</sup> y en las cordilleras montañosas del sur central de Asia, incluyendo el Karakoram, K'un Lun Shan, Hindu Kush y Pamir, cerca de 109,000 km<sup>2</sup>. África abriga sólo 12 km<sup>2</sup>, orden de magnitud que está a la par con México, donde se encuentran en los picos de los volcanes más altos (Sharp, 1988) (Figura 4).

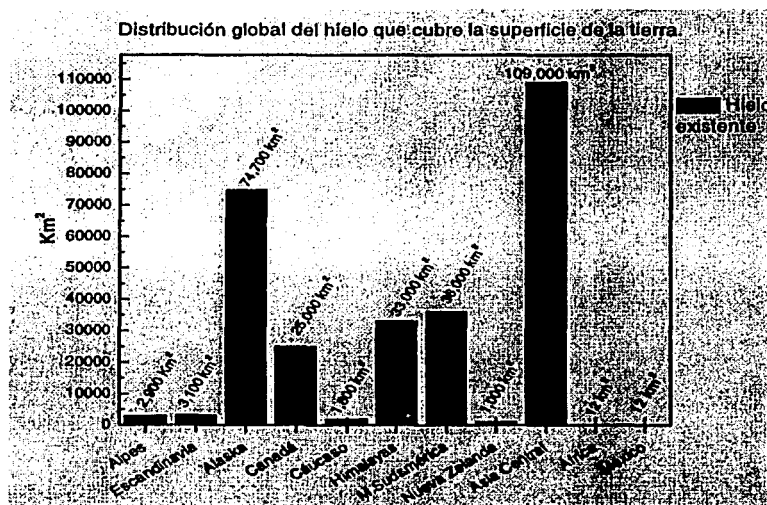


Figura 4. Grafica que muestra la distribución del hielo existente a nivel mundial, principalmente como corrientes en la superficie de la Tierra, con base en datos de Sharp, 1988 y Lorenzo, 1964.

## II.2. Partes de un glaciar.

### II.2.1. Zonas glaciadas.

Cualquier glaciar tiene dos partes principales, una superior o área interior, donde la cantidad de nieve que se acumula cada año es mayor que la que se funde y la parte baja o área exterior, donde toda la nieve se funde.

En esta parte baja, parte del hielo glacial es fundido y expuesto por debajo de la capa de nieve que desaparece. La parte superior, tiene un exceso de nieve, y es referida como área de acumulación, mientras que la parte baja, tiene deficiencia de nieve y es referida como área de pérdida o área de ablación (Sharp, 1988).

Todos los procesos por medio de los cuales se añade masa a un glaciar contribuyen a la acumulación. Las nevadas, la lluvia, las avalanchas de nieve desde los lugares altos de las laderas de un valle y la escarcha formada por la recristalización del vapor de agua de la atmósfera al entrar en contacto con la superficie del glaciar, entre otras, contribuyen a la acumulación (Robinson, 1990).

El término **acumulación** incluye todos los procesos, por medio de los cuales, hielo sólido y nieve es adicionado a un glaciar y varía mucho según las condiciones climáticas. La acumulación en los glaciares ocurre principalmente por la precipitación de nieve o lluvia que se congela al penetrar a zonas bajas. El agua líquida fresca y la condensación directa en el hielo a partir de vapor (sublimación) es una causa de acumulación y material que puede ser adicionado al glaciar por las ventiscas o avalanchas.

En un sitio particular de un glaciar, la acumulación puede exceder a la ablación durante parte del año. Durante este tiempo, se incrementa el espesor de la nieve y la congesta. Durante un año completo, la masa acumulada sobre parte del glaciar puede exceder la masa que se pierde por la ablación. Esta parte del glaciar es la zona de acumulación (Figura 5).

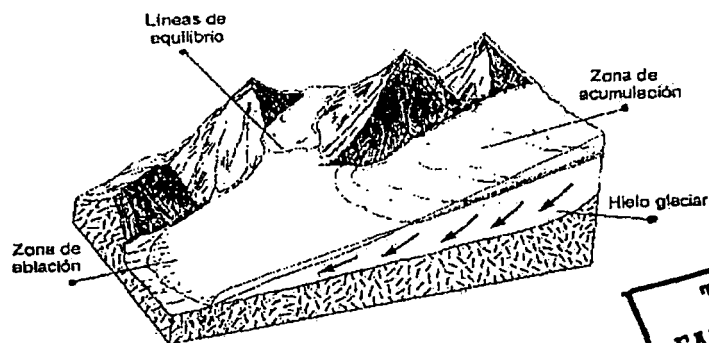


Figura 5. Esquema en donde se muestran las principales zonas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## II.2.2. Zona de acumulación.

La zona o área de acumulación puede estar formada por subzonas como la de nieve seca (*dry snow zone*), la de percolación A y B (*percolation zone A y B*), la de nieve parcialmente fundida (*slush zone*) y la de hielo sobrepuesto (*superimposed ice zone*) así como sus límites entre dichas zonas (Embleton y King, 1968) (Figura 6).

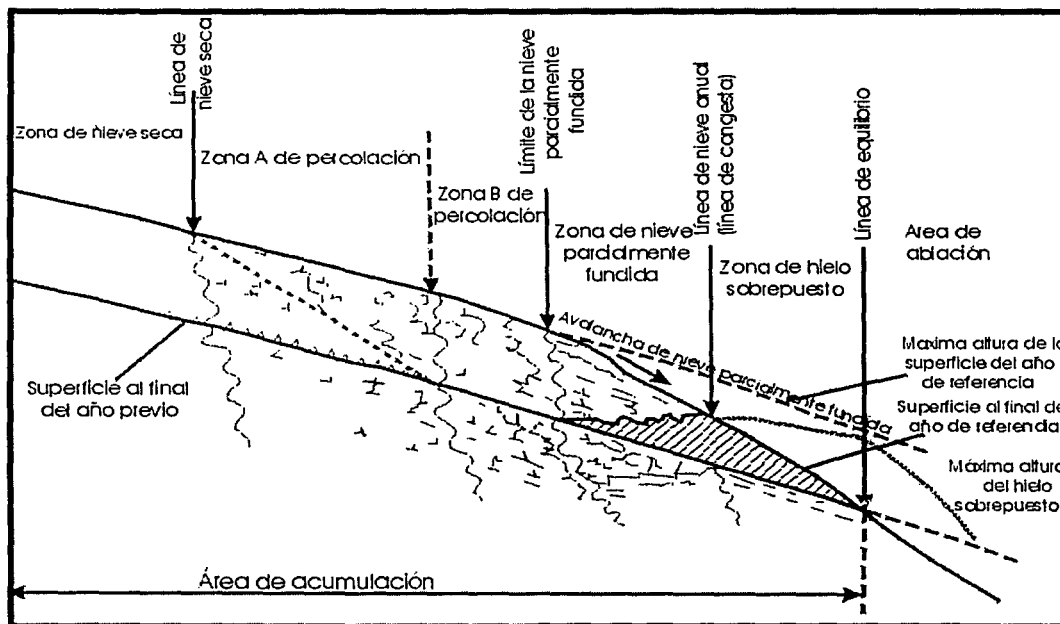


Figura 6. Se muestran las diferentes áreas de acumulación formada por otras zonas como la de nieve seca (*dry snow zone*), la de percolación A y B (*percolation zone A y B*), la de nieve parcialmente fundida (*slush zone*) y la de hielo sobrepuesto (*superimposed ice zone*) así como sus límites entre dichas zonas (Embleton y King, 1968).

La **zona de nieve seca** (*dry snow zone*) es la más alta y siempre tiene temperaturas debajo de  $0^{\circ}\text{C}$ , se caracteriza por la ausencia de fusión incluso en el verano, así que no existe penetración del agua fundida. La **zona de percolación** (*percolation zone*) yace debajo de esta zona, y esta dividida en dos partes. La primera de arriba, **zona A**, en la que la percolación no es abundante en la

superficie del año previo y antes del verano. Sin embargo, la temperatura no es más elevada de 0° C debajo de la superficie y el agua fundida puede penetrar un poco. En la **zona B**, algunas veces ocurre en las estaciones en las que se funde el agua y penetra, ésta se congela en forma de lentes de hielo en lo que sería una acumulación temprana. En general, en esta zona existe algo de fusión superficial. El agua puede percolarse a cierta distancia entre la nieve a temperaturas bajo cero antes de congelarse. Si el agua se encuentra con una capa impermeable se propaga lateralmente. Al congelarse puede formar una capa o lente de hielo. Los canales verticales de agua también se pueden congelar cuando el aporte de agua cesa, formando estructuras denominadas glándulas de hielo.

Debajo de la zona B yace la **zona de nieve parcialmente fundida** (*slush zone*), a partir de la cual el material puede ser eliminado por avalanchas de nieve parcialmente fundida. Estas avalanchas son causadas por la saturación de la nieve en el hielo denso llamado **hielo sobrepuesto** (*superimposed ice*), el cual se forma por la congelación de la nieve fundida o lluvia, que es impermeable y causa que el material se remueva con una pequeña inclinación de 3 o 4 grados. En las zonas de percolación y en las de nieve mojada o húmeda que se describen mas adelante, el material consistente en capas, lentes y glándulas, está separado por capas y parches de nieve y congesta. En elevaciones bajas, sin embargo, el agua de fusión se presenta como una masa continua de hielo sobrepuesto expuesto en la superficie. La parte superior de esta zona es llamada **límite de la nieve parcialmente fundida** (*slush limit*).

Las avalanchas de nieve parcialmente fundida algunas veces son acarreadas al hielo sobrepuesto y debajo de la acumulación mas vieja bajo la línea de equilibrio. La acumulación mas vieja del verano previo, puede ser separada a partir de la acumulación que ocurrió en la temporada por la formación de la acumulación profunda entre dos capas. La acumulación profunda consiste en cristales largos en forma de cubos o barras y resultan a partir de los cambios en la

nieve caracterizados por los cambios de clima de temporada. Algunas de estas zonas se muestran en la Figura 6.

### ***II.2.3. Zona de ablación.***

La **ablación** se refiere a todos los procesos por medio de los cuales un glaciar pierde hielo y nieve, se encuentra bajo la línea de equilibrio. En ella predominan la fusión y el escurrimiento (principales procesos de ablación), la sublimación (paso directo del estado sólido al gaseoso), la erosión eólica, remoción de nieve o hielo por avalanchas (Embleton y King, 1968) y el desprendimiento de los icebergs en el caso de tratarse de casquetes de hielo como los de la Antártida o Groelandia (Robinson, 1990) o el desprendimiento de séracs inestables (Figura 7), (Hugo Delgado, com. per.).



Figura 7. Muestra los Seracs, que son pináculos dentados de hielo inestable formados debido a la intersección de dos series de grietas en las partes en donde la superficie del glaciar es fracturado.

En determinadas épocas del año predomina la ablación y disminuye el espesor del glaciar. En la zona de ablación, ésta es mayor que la acumulación que se dá sobre el glaciar anualmente (Figura 8). En las regiones templadas pueden identificarse claramente las zonas de acumulación y de ablación de los glaciares de valle. La distinción es menos obvia en los glaciares polares. En un glaciar de valle típico, la zona de acumulación yace corriente arriba en donde el clima es mas frío que el de la zona de ablación más baja localizada corriente abajo.

La ablación varía mucho según las condiciones climáticas y, en condiciones climáticas iguales, según el *albedo*, es decir, el porcentaje de rayos reflejados con respecto a los rayos incidentes. El albedo depende mucho del color: el blanco refleja la totalidad de los rayos incidentes, de manera que la fusión de un glaciar se interrumpe en la práctica desde que cae la primera nieve en otoño, que lo blanquea. Una delgada capa de polvo favorece la fusión por su color oscuro, pero una capa gruesa protege al hielo, de la misma manera que una piedra gruesa colocada sobre el glaciar.

La ablación es considerable en la parte baja del glaciar. Por esta razón, fuera de las áreas particularmente húmedas y frías las condiciones de ablación más que las de alimentación, son las que regulan la extensión de los glaciares.

Esta importancia de la ablación tiene por consecuencia un retroceso muy rápido del glaciar si se eleva la temperatura, mientras que un enfriamiento o aumento de las precipitaciones se traducen, con un claro retraso, en una progresión de los frentes de los glaciares, que depende del trayecto del hielo entre el área de alimentación y el frente que se realiza a veces en un tiempo muy largo.

#### ***II.2.4. Zona de nieve mojada.***

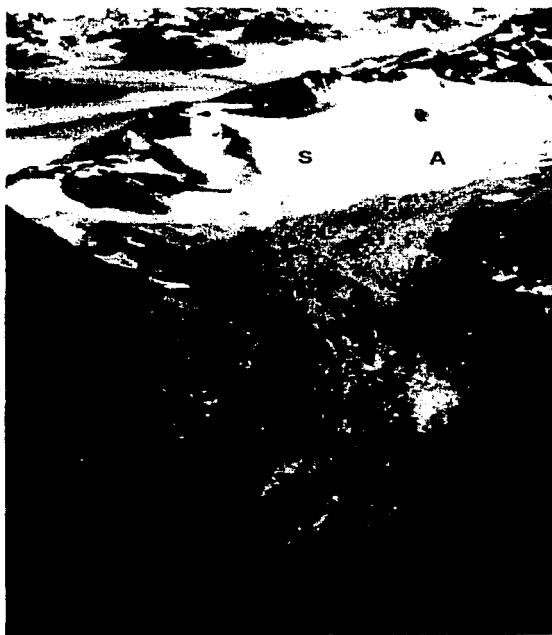
La percolación profunda del agua fundida se incrementa con el decrecimiento de la elevación hasta el punto del glaciar (línea de nieve mojada) que marca el límite superior de la zona de nieve mojada (Figura 8), donde toda la nieve se deposita durante el período de invierno previo que sobrepasa los cero grados centígrados.

En esta zona, para el final del verano, toda la nieve depositada durante esta estación y la que ha sobrevivido del verano anterior previo sobrepasa los 0° C, lo que genera agua de fusión que puede percolarse hacia capas profundas, y que ha sido depositada en años previos, pero ésta no es una cantidad suficientemente

necesaria para que sobrepase esta temperatura de 0° C. La percolación dentro de estas capas puede ocurrir en las partes bajas de la zona de percolación. Esto es importante para encontrar las salidas en donde esto sucede porque, cuando esto pasa, la medición del balance de masa no puede ser restringida a las capas de los años en curso.

### ***11.2.5. Línea de equilibrio.***

La línea que divide el área de acumulación del área de ablación es llamada **línea de equilibrio** (Figura 9). Esta línea no debe ser confundida con la *línea de nieve anual* o *línea de congesta* (Figura 8), que se refiere a nieve húmeda que ha sobrevivido a la estación de ablación y ha iniciado su transformación a hielo, y su densidad varía entre 400 y 830 kg/m<sup>3</sup>. Las dos líneas pueden a veces confundirse o considerarse idénticas, sin embargo éstas no coinciden.



**Figura 8.** Vista inusual del glaciar en las montañas San Elías en Canadá territorio de Yukón, en donde se observan las áreas de acumulación (A), área de ablación (W), línea de congesta (FL), congesta (F) y la nieve de invierno (S) (Sharp, 1988).

La línea de nieve anual es una línea en el glaciar que se relaciona con la temporada de caída de nieve en la estación de invierno y que desaparece casi en su totalidad en la estación de verano por ablación. Sin embargo, en algunos glaciares ésta puede ser una acumulación de hielo denso entre la línea de nieve anual y la línea de equilibrio, que yace en el nivel más bajo. Este hielo denso es llamado **hielo sobrepuesto** (*superimposed ice*) y es formado por la congelación de la nieve fundida o lluvia (Embleton y King, 1968).

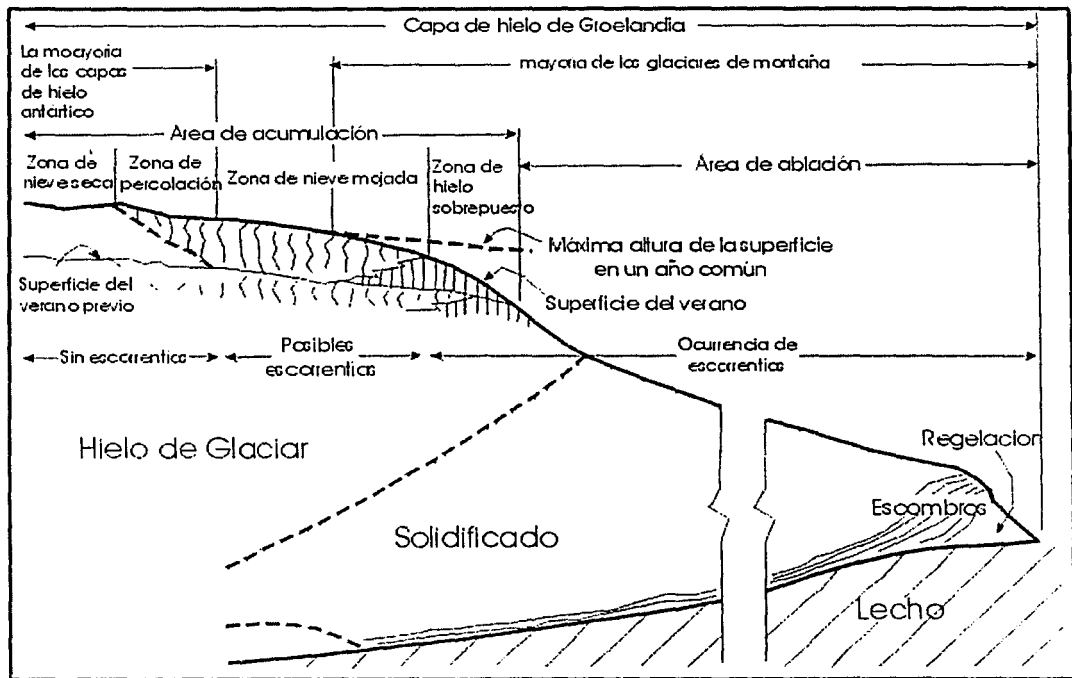


Figura 9. Se muestran las diferentes áreas y sus límites (Benn y Evans, 1998).

### II.2.6. Línea de las nieves.

La nieve persiste por encima de un cierto límite que se fija según la altitud, la latitud y factores locales.



El nivel por debajo del cual la nieve funde en verano, es decir, el borde más bajo donde un campo de nieve permanece (si está presente), se llama *nivel de las nieves perpetuas*. Su altitud varía con la latitud, desde el nivel del mar en las regiones polares hasta 610 m en el sur de Groelandia y el sur de Chile, 1525 m en el sur de Noruega y el sur de Alaska, 2750 m en los Alpes, 4420 m (Assam) - 5800 m (Cachemira) en el Himalaya y 5200 - 5500 m en los altos picos ecuatoriales de África y de los Andes (Holmes, 1980).

### ***II.3. Régimen glacial.***

El **régimen glacial** concierne a la pérdida y ganancia de hielo en los glaciares. Cuando los glaciares o las capas de hielo tienen un régimen positivo, estos ganan hielo, avanzan y se engrosan. Cuando sucede lo contrario, el régimen que presenta es negativo. El régimen glacial está íntimamente relacionado con el clima y los cambios climáticos.

Desde el punto de vista de la geomorfología glacial, el régimen glacial es importante por el efecto que provoca en el comportamiento del hielo. Este está directamente relacionado con la formación de morrenas, que son los escenarios de las marcas de avance y retroceso, líneas de recorte o división, algunos cambios de las aguas de fusión y otros rasgos (Embleton y King, 1968).

#### ***II.3.1. Avance y Retroceso.***

A continuación se describen los procesos de avance y retroceso según Robinson (1990).

El tamaño de un glaciar se encuentra casi siempre en un proceso de cambio. Si el equilibrio ideal entre acumulación, ablación y movimiento del hielo llega a existir, es probable que persista únicamente durante un período corto. Cuando no se conserva la masa, un glaciar se expande sobre un área mayor o

retrocede por fusión. Bajo ciertas condiciones, estos ajustes hacen que el glaciar se vuelva más estable en su ambiente. En otras circunstancias, los ajustes pueden hacer que el glaciar se vuelva cada vez más inestable.

Los factores que controlan la localización de la línea de equilibrio en un glaciar afectan la estabilidad de la masa de hielo. La temperatura media anual y la variación estacional de la temperatura influyen sobre su posición. La temperatura media anual tiende a disminuir con el incremento de la latitud y con el incremento en la elevación.

La precipitación atmosférica, la cual tiende a ser más alta sobre las zonas costeras que en el interior de los continentes, influye también sobre la posición de la línea de equilibrio de un glaciar. Tomando en cuenta estos factores, se puede entender porque las líneas de equilibrio son altas en las zonas ecuatoriales del interior de los continentes y son más bajas en zonas de mayor latitud y más próximas al mar. Durante períodos de cambio en el balance de masa, un glaciar puede responder a los factores de cambio sin modificar la localización de la línea de equilibrio y, en consecuencia, manteniendo constante la zona de acumulación.

El tamaño de la zona de ablación presentará un incremento en el flujo de hielo desde la parte baja de la zona de acumulación o disminuirá por derretimiento hasta obtener un tamaño a partir del cual la ablación se equilibra con la acumulación. Este tipo de ajuste tiende a hacer al glaciar más estable en su ambiente.

Durante cambios ambientales se puede alterar el área de la zona de acumulación, modificando la posición de la línea de equilibrio. El glaciar, entonces, responde a dicho cambio expandiendo o disminuyendo la zona de ablación para restablecer el equilibrio entre la zona de acumulación y la de ablación. Este cambio tiende a hacer al glaciar más estable en este nuevo ambiente.

Considerando que la altitud sea el factor dominante que controla la posición de la línea de equilibrio (despreciando la influencia de la latitud) y que un cambio en el ambiente provoca un aumento en la precipitación de nieve, la nieve adicional incrementa la altura del glaciar, y aumenta el área de la zona de acumulación. Entonces, el glaciar tenderá a fluir ocupando un área mayor.

Si el glaciar se hace más grueso, su área de acumulación se incrementa aún más, lo que a su vez provoca que se expanda todavía más. Para el glaciar le es imposible deshacerse de la acumulación cada vez mayor al mismo tiempo que establecer una forma de equilibrio. Entonces se vuelve más y más inestable hasta que crece lo bastante como para alterar el clima que inicio su crecimiento.

Un cambio en el clima que provoca una disminución en la tasa de precipitación de nieve hará que un glaciar se vuelva cada vez más inestable si la línea de equilibrio permanece a una elevación fija. El glaciar entonces retrocede como una respuesta a la disminución en la acumulación. Conforme el glaciar retrocede se hace cada vez más delgado. Pero conforme se hace más delgado, la altura del glaciar disminuye y el área de acumulación se hace cada vez más pequeña.

Esto a su vez provoca mayor retroceso y adelgazamiento adicional. Por consecuencia, el glaciar se vuelve cada vez más y más inestable y retrocede a una velocidad cada vez mayor hasta que se funde totalmente (Robinson, 1990).

#### ***II.4. Dinámica glacial.***

Los glaciares son agentes geomorfológicos muy importantes. El hielo se desplaza lentamente sobre el relieve, comportándose como un material plástico, erosionando en unas zonas y transportando y depositando materiales (sedimentos) en otras.

El hielo se mueve por dos procesos diferentes:

- Flujo interno: tiene lugar por deformación de la estructura de los cristales. En las partes superficiales el hielo es mas frágil, produciéndose grietas. Pero en el interior el comportamiento es mas plástico y los cristales de hielo se deslizan unos sobre otros.
- Deslizamiento basal: La masa de hielo, se desplaza en bloque sobre el fondo. En la base del glaciar puede existir una película de agua líquida que reduce el rozamiento facilitando el movimiento del hielo sobre el sustrato rocoso. Esto sucede con frecuencia en los glaciares templados.

La erosión glacial comprende diferentes mecanismos: 1) **arranque de fragmentos** y 2) **desgaste y abrasión**. Los materiales, una vez incorporados al hielo, pueden ser transportados a grandes distancias hasta que son abandonados en la zona de ablación. Si se encuentran en la superficie o en el interior del glaciar no experimentan grandes cambios durante el transporte.

Los materiales que viajan en el contacto hielo-roca se van desgastando y redondeado, adquiriendo formas características, como los bloques "en plancha" (clastos con formas pentagonales, que tienen la superficie pulida y estriada). En esta zona, el desgaste tanto de los detritos en transporte como del sustrato sobre el que se deslizan produce gran cantidad de materiales finos (arcillas) que se denominan **harina de glaciar**.

En la zona de ablación, cuando el hielo se funde, es donde los glaciares depositan la mayor parte de su carga. Estos materiales, en general con formas angulosas, tamaños variados y sin clasificar, se denominan till. En ocasiones, el till se presenta dando formas de relieve características que se conocen con el nombre de morrena. Dependiendo de la posición que ocupen, se distinguen: **morrenas laterales, centrales, de fondo y frontales** que posteriormente serán descritas.

### **II.4.1. Física de glaciares.**

En un sistema glacial, son múltiples las interrelaciones existentes tanto en su interior como al exterior, lo que genera numerosos procesos que permiten tanto la formación de un glaciar como su desarrollo posterior e incluso su extinción. El estudio de estos procesos bajo la perspectiva de la física es importante porque nos permite tener una mejor comprensión de la dinámica de un glaciar.

Existen diferentes clasificaciones para los glaciares, sin embargo, las condiciones varían de un punto a otro del glaciar por lo que muy pocos glaciares pueden ser clasificados dentro de una sola categoría. Idealmente un glaciar está constituido por diversas zonas ya mencionadas, los límites entre ellas pueden variar de un año a otro de acuerdo con las condiciones climáticas.

La caída de nieve sobre un glaciar es el primer paso en la formación de hielo glacial. Este proceso mediante el cual la nieve se transforma a hielo depende del clima (Paterson, 1994), es por ello que este proceso es diferente en las zonas de nieve seca y de nieve mojada o húmeda. Por otro lado, Benn y Evans (1998), señala que la transformación varía de acuerdo con el tipo de región en la que se encuentra localizado el glaciar.

En el interior de Groelandia y la Antártida, y cerca de las cimas de montañas elevadas como Alaska, el Yukón y posiblemente en Asia Central, la transformación de nieve a hielo en la zona de nieve seca que se caracteriza porque en ella no se presenta ablación, ni siquiera durante el verano. En esta zona, la transformación es análoga al proceso de agregación por presión que se da en la cerámica. Este proceso se produce cuando un agregado de partículas se calienta bajo una presión, provocando la formación de enlaces entre ellas y generando en consecuencia un incremento en su tamaño. Los espacios de aire entre las partículas se reducen y la densidad del agregado se incrementa.

La transformación es resultado del desplazamiento mutuo entre los cristales, gracias a que se producen cambios de tamaño y forma, y a que se produce deformación interna. La importancia relativa de estos procesos cambia al incrementarse la densidad. Estos cambios se producen fácilmente porque el hielo, a diferencia de otros sólidos, permanece generalmente cerca de su punto de fusión.

Las moléculas se encuentran relativamente libres para moverse dentro de la red de hielo y sobre la superficie del cristal, favoreciendo la sublimación. Esta comprende la secuencia de cambios de sólido a vapor, movimiento de vapor y cambio de vapor para regresar a sólido, lo que implica que los cambios entre sólido y vapor tienen lugar sin pasar por la fase líquida. Una reducción del área superficial provoca una reducción de la energía libre. Por lo que las moléculas tienden a ser redistribuidas de manera que se reduce la superficie total de los cristales, las hojuelas de nieve de formas complejas son gradualmente transformadas a partículas redondeadas.

El factor más importante en los estados iniciales de transformación es el acomodo de las partículas, esto es, el desplazamiento individual de las partículas con relación a sus vecinas. La redondez de las partículas facilita este reacomodo. El empaquetamiento de partículas esféricas no es el resultado final. El área de superficie total puede ser reducida por transferencia de material a los puntos de contacto entre partículas para formar enlaces.

La sublimación, más que la difusión, es el proceso dominante en los estados iniciales (Hobbs y Mason, 1964 en Paterson, 1994), la formación de enlaces inicia antes de que la densidad llegue a  $550 \text{ kg/m}^3$ . Al incrementarse la densidad, la congesta se vuelve menos porosa, provocando que la sublimación se reduzca de manera importante. Al mismo tiempo, la carga y el área de contacto entre granos se incrementa. La recristalización y la deformación llegan a ser los procesos dominantes: la difusión molecular cambia la forma y tamaño de los

cristales de manera que reduce el esfuerzo sobre ellos. Adicionalmente, los cristales individuales se deforman por desplazamiento a lo largo de planos internos de deslizamiento.

Cuando la densidad alcanza cerca de  $830 \text{ kg/m}^3$ , los espacios de aire entre los granos están sellados. Mucho del aire ha escapado a la superficie, el restante, cerca de 10% en volumen, está presente sólo en forma de burbujas. Es entonces cuando la congesa se ha convertido en hielo glacial. A bajas densidades, el esfuerzo vertical compresivo es mayor que el de las componentes horizontales. Sin embargo, conforme la densidad de la congesa se aproxima a la densidad del hielo todos los patrones de esfuerzo llegan a ser aproximadamente hidrostáticos, por lo que los cristales no crecen en una dirección preferente.

Bajo ciertas circunstancias, la transformación de nieve recién depositada se produce de una manera diferente. En lugar de pequeños granos redondeados se producen cristales grandes en forma de prisma, pirámides o especie de copas huecas hexagonales, éstas se denominan escarcha de profundidad (*Depth Hoar*).

Este es el tipo de grano más grueso de la congesa que puede formarse en ausencia de agua de fusión. El tamaño promedio del grano es de 2 a 5 mm, sin embargo, algunos cristales pueden ser más grandes. Este tipo de congesa es de elevada porosidad y baja densidad ( $100 - 300 \text{ kg/m}^3$ ), se produce sólo dentro de paquetes de nieve.

La diferencia de cómo la transformación de nieve a hielo se produce en una zona de nieve seca a una zona de nieve mojada o húmeda, se presenta sólo en el verano y a la máxima profundidad en la que el agua penetra, el resto del año el mecanismo de transformación es el mismo que en una zona de nieve seca.

El empaquetamiento de granos es el factor más importante en los estados iniciales de la transformación. La fusión se incrementa a una tasa en la cual los granos llegan a redondearse debido a la fusión de sus extremidades. El tamaño promedio del grano se incrementa porque los granos pequeños tienden a fundirse antes que los mas grandes. La unión de los granos es particularmente rápida en las capas superficiales debido a que están bajo un ciclo de enfriamiento y calentamiento, por lo que la densidad máxima de empaquetamiento se obtiene más rápidamente en una zona con agua de fusión que en una zona de nieve seca.

El recongelamiento de grandes cantidades de agua de fusión para formar capas de hielo y lentes representa una rápida transición de nieve a hielo. Una zona de hielo sobrepuesto representa el caso extremo en el cual la nieve es transformada a hielo en un solo verano.

La transformación en regiones polares y regiones de elevada altitud en las cuales la ablación no es tan importante, los principales mecanismos que permiten un incremento en la densidad son: la reestructuración por el viento, el movimiento relativo de los cristales uno con respecto a otro, cambios en el tamaño y forma del cristal, y la deformación interna de los cristales (Benn y Evans, 1998).

La presión ejercida por la nieve sobreyacente provoca que los cristales se muevan uno con respecto al otro y adopten un empaquetamiento más estable. Como resultado, la compactación se incrementa con la profundidad. Este proceso es originado por cambios progresivos en el tamaño y forma de los cristales dentro de los paquetes de nieve. Un nuevo cambio de volumen puede resultar de la deformación interna o reptación de los cristales de hielo cuando la presión se incrementa.

En regiones de baja altitud y regiones de baja y media latitud, la transformación de nieve a hielo se acelera en forma considerable cuando se presenta la ablación en la superficie o dentro de los paquetes de nieve (Benn y



Evans, 1998). El agua se percola a través de la nieve, en donde, al contacto con la nieve fría o hielo se congela formando lentes horizontales o glándulas verticales de hielo sobrepuesto. La formación de hielo sobrepuesto produce un calentamiento de la nieve circundante haciendo mas favorable que la fusión se presente.

La formación de hielo sobrepuesto es particularmente importante en áreas donde la acumulación de nieve es baja, permitiendo la penetración de ondas estacionales a partir de la superficie. En áreas templadas de baja altitud, la nieve se transforma a hielo a sólo 13 m de profundidad o en un lapso de 3 a 5 años bajo carga. En contraste, en un ambiente continental frío, el cambio ocurre a una profundidad de 66 m lo que equivale a más de 100 años desde que fue cubierto (Paterson, 1994).

Bajo una presión orientada, el hielo, como cualquier sustancia cristalina, puede comportarse como un cuerpo elástico, plástico o quebradizo. Los factores que determinan este comportamiento son la cantidad y tipo de esfuerzo, la tasa de incremento del esfuerzo, la temperatura y posiblemente la deformación previa.

A menor temperatura, el hielo manifiesta sus propiedades elásticas y frágiles, a mayor temperatura su comportamiento es más plástico. La dureza del hielo a temperaturas cercanas a 0° C es de 1.5 en la escala de Mohs. La viscosidad del hielo disminuye especialmente rápido al aproximarse a 0° C, lo que favorece el movimiento interno y con ello la posibilidad de fusión parcial.

Fundamental en todos los tratamientos teóricos de flujo glacial y de deformación en otros materiales, es la llamada relación constitutiva, que describe la respuesta del hielo ante un esfuerzo aplicado. En estudios glaciales, la relación constitutiva es llamada *Ley de flujo de hielo*, conocida como *Ley de Glen*. La relación depende de las condiciones de carga, presión confinante, estado de

esfuerzo y otros factores. La relación entre la tasa de esfuerzo y el esfuerzo cortante tiene la forma de:

$$\epsilon_{XY} = A \tau_{XY}^n \dots \dots \dots \text{Ley de Glen}$$

Donde  $n$  es una constante,  $A$  depende de la temperatura del hielo, orientación del cristal, contenido de impurezas y de otros factores,  $\tau$  se refiere al esfuerzo cortante en el hielo. Los valores de  $n$  (factor que se mide de 1 a 10) varían de 1.5 a 4.2 con un promedio de 3, este último valor es el que se utiliza en estudios glaciales. El flujo de hielo difiere marcadamente del de un fluido Newtoniano viscoso para el cual  $n = 1$  y la viscosidad es  $1/A$ .

La deformación del hielo puede entenderse en términos del movimiento de dislocación dentro de los cristales. Una dislocación es un defecto lineal en la estructura del cristal, ésta puede considerarse como una frontera entre dos regiones, una de las cuales se desliza con respecto de la otra.

La dislocación permite que los planos de los átomos se muevan mucho más fácilmente que en un cristal perfecto. Esto explica porque incluso un esfuerzo pequeño produce deformación. El hielo se deforma más fácilmente mediante el movimiento de dislocación en el plano basal en donde no existe una dirección preferencial.

Los policristales se deforman mucho más lentamente que un solo cristal porque la mayoría de los cristales no están orientados para un deslizamiento en su plano basal en la dirección del esfuerzo aplicado. Varios procesos contribuyen a la deformación del hielo policristalino. Además del movimiento de dislocación dentro de los cristales, los cristales se mueven en relación uno con otro. El crecimiento del cristal, la migración de los límites del cristal y la recristalización dinámica (la

nucleación y crecimiento de nuevos cristales favorablemente orientados para la deformación) son también importantes.

La presencia de agua aumenta la tasa de deformación de hielo policristalino facilitando el ajuste entre los granos vecinos con diferentes orientaciones, ajuste que ocurre tanto por el deslizamiento entre el borde de los granos como por fusión y congelamiento. Las impurezas que se pueden encontrar en el hielo pueden tener un efecto sobre éste y son de dos tipos: sólidas y solubles. Estas impurezas pueden aumentar o disminuir la tasa de reptación (*enhanced creep*) y deformación del hielo. Se han encontrado impurezas como cloruro de sodio proveniente del océano, y los ácidos sulfúrico e hidrocórico que provienen de los volcanes que en concentraciones suficientemente elevadas podrían influir en el flujo de las hojas de hielo.

El efecto que la densidad puede tener es mínimo, una vez que los poros han sido sellados no se presentan variaciones significativas en la tasa de esfuerzo, lo que implica que las burbujas de aire no tienen ningún efecto mecánico en las propiedades del hielo. La densificación cuenta para un incremento del esfuerzo más en la congesa que en el hielo. Debido a que partes significativas de masas polares consisten en congesa, sus propiedades mecánicas pueden ser importantes para su dinámica. Sin embargo, debido a que la congesa es compresible y el hielo no, la relación es compleja.

El movimiento del glaciar se produce entre este y su lecho. Para que un glaciar se deslice, es necesario que el hielo se encuentre en su punto de fusión o muy cercano a este de forma que pueda vencer la resistencia al movimiento. Los factores más importantes que controlan la resistencia al deslizamiento glacial son: la adhesión debida al congelamiento del lecho, la rugosidad del lecho, la cantidad y distribución del agua en el lecho y la cantidad de detritos en la base del glaciar (Benn y Evans, 1998).

Es importante considerar que las condiciones de congelamiento y fusión en un glaciar pueden presentarse como un mosaico discontinuo sobre los lechos glaciales, este mosaico puede estar constituido por parches derretidos sobre un lecho congelado o parches congelados sobre un lecho derretido. En los lugares donde el lecho está congelado, la resistencia será mayor que el promedio debido a la resistencia adhesiva del contacto entre el hielo y el lecho.

La rugosidad en el lecho glacial puede variar dependiendo de la escala, sin embargo, para que el hielo se deslice, es necesario que pase a través o rodee los obstáculos de diversas dimensiones que se encuentran sobre su lecho. Se reconocen dos mecanismos básicos por medio de los cuales el hielo puede pasar los obstáculos de su lecho: el deslizamiento por regelación y mediante reptación (*enhanced creep*).

El deslizamiento por regelación, involucra la ablación del hielo y su posterior regelación (Weertman, 1964 y 1975 en Benn y Evans, 1998). El otro mecanismo por medio del cual se produce el deslizamiento del hielo sobre su lecho, es el de reptación del hielo en la vecindad de los obstáculos. La importancia de la regelación y la reptación depende del tamaño de los obstáculos que existen en el lecho glacial. Así, para obstáculos pequeños la regelación es el proceso dominante, en tanto que para los grandes la reptación es el proceso fundamental.

La presencia de agua líquida en el lecho glacial es necesaria para que se produzca el deslizamiento, el agua es fundamental para vencer la adhesión del hielo al lecho y es muy importante también en el proceso de regelación. El agua contribuye a la efectividad del deslizamiento, la distribución y presión del agua en el lecho se reconocen como factores fundamentales en la regulación de los cambios de velocidad de un glaciar en lapsos cortos y en ciclos de oleada glacial (*surge*).

Para glaciares sobre lechos rocosos, la presencia de una película de agua favorece el deslizamiento creando un lecho liso y reduciendo la importancia de los procesos de regelación como un factor limitante del deslizamiento. Las tasas de deslizamiento serán mayores al elevarse la presión de agua sobre los lechos lisos más que sobre los rugosos. Por mucho tiempo se consideró el deslizamiento para hielo limpio, sin embargo, en la naturaleza el hielo contiene cantidades variables de detritos, que al ponerse en contacto con el lecho, producen una fuerza de fricción misma que ejerce gran influencia en el deslizamiento glacial. En general la relación es, a mayor fricción menor velocidad de deslizamiento.

El flujo de hielo hacia el lecho ejerce una fuerza de tracción sobre las partículas presionándolas contra el lecho. El hielo fluye hacia el lecho como resultado de tres procesos: a) fusión debida al calor geotérmico producida por la fricción durante el deslizamiento, b) la fusión debida al deslizamiento por regelación, y c) la deformación vertical del hielo.

Esto no significa que los glaciares con elevada concentración de detritos en su base fluyan más lentamente que los constituidos por hielo limpio. Más bien, significa que en donde la tracción por fricción es elevada, se requieren esfuerzos elevados que propicien el deslizamiento.

#### ***II.4.2. Balance de masa.***

El balance de masa es el cambio en la mediciones de masa en ciertos puntos en cualquier tiempo y éste puede ser positivo o negativo (Østrem y Brugman, 1991).

El balance de masa de los glaciares se define como la diferencia entre la ganancia y la pérdida (expresada en términos de equivalente de agua) medido sobre un periodo específico de tiempo, generalmente un año (Benn y Evans, 1998).

Los cambios netos en la masa del glaciar entre los mismos datos en años sucesivos definen el balance de masa anual para un calendario de medición de un año. Sin embargo, algunos glaciólogos prefieren usar el balance del año, que es la medición entre dos masas mínimas anuales sucesivas del glaciar. Porque las variaciones del clima entre los años, que son variaciones largas, proporcionan una mejor medición total de los cambios anuales del almacenamiento de masa (Paterson, 1994).

El balance de masa anual es la suma de la acumulación anual y la ablación anual, que es la cantidad en bruto de la masa ganada y perdida, respectivamente, sobre el calendario de balance del año. En áreas en donde las variaciones estacionales son pronunciadas en caída de nieve y temperatura, ésta es usada para subdividir la acumulación anual y la ablación dentro del invierno y verano totales. Específicamente el balance de masa anual es el cambio neto en la masa de un punto particular en el glaciar.

La extensión areal de los glaciares depende de las condiciones de alimentación y fusión. Se llama *balance glacial* a la suma algebraica de las cantidades positivas que representan la alimentación y de las cantidades negativas que representan la ablación. Si el balance es igual a cero, el volumen de hielo no aumenta ni disminuye. Un balance negativo se traduce en un retroceso; un balance positivo, en un avance del frente del glaciar.

El balance negativo en un glaciar es consecuencia del predominio del proceso de ablación sobre la acumulación, las consecuencias pueden ser: disminución en el área y espesor, pérdida en la capacidad de flujo y retroceso altitudinal del glaciar (Benn y Evans, 1998).

En un glaciar, el balance puede estudiarse en un corte altitudinal: la acumulación predomina en la parte superior, y la ablación en la inferior. La altitud en la cual se pasa de la primera situación a la segunda se determina con mayor

precisión en este caso que en el de las nieves persistentes, muy sujeta a variaciones locales.

El centro de un glaciar se mueve más rápidamente que los lados, la velocidad de avance aumenta con la pendiente, con el espesor y la temperatura del hielo y con el estrechamiento del cauce por la aproximación de las laderas. El movimiento es retardado por la presencia en el hielo de una carga de derrubios y por el rozamiento contra el cauce rocoso. Esto sugiere que la corriente de los glaciares depende principalmente de las diferencias de esfuerzo y de la temperatura.

## ***II.5. Clasificación de glaciares.***

### ***II.5.1. Clasificación morfológica.***

Se basa principalmente en el tamaño, forma y posición de la masa de hielo, distinguiéndose entre otros, los glaciares de circo, glaciares de valle y glaciares de piedemonte (Holmes, 1980).

Los glaciares pueden dividirse principalmente en:

*Mantos y casquetes* de hielo esparcidos en regiones continentales o de meseta, donde es muy bajo el nivel de nieves perpetuas, y que se deslizan hacia las márgenes con un movimiento en masa muy lento. La masa de hielo tiene un área menor de 50,000 km<sup>2</sup>, pero lo suficientemente grande para deprimir la topografía subyacente y cuyo flujo es una consecuencia de su tamaño y forma. Consiste en un domo de hielo central junto con lenguas glaciales de salida que emergen desde la periferia.

*Glaciares de circo*, son cuerpos relativamente pequeños de hielo, neviza y nieve que ocupan una cavidad excavada en la roca, con una forma semiesférica, generalmente más ancha que larga y no presenta ningún tipo de lengua. Se abastece activamente de nieve y, por lo tanto, muestra un comportamiento vigoroso en el que se incluyen deslizamientos rotacionales.

*Glaciares de valle o de montaña*, que ocupan los valles preexistentes de alineaciones montañosas que se elevan por encima del nivel de las nieves perpetuas.

*Glaciares de piedemonte*, que se componen de mantos de hielo formados por la reunión de varios glaciares de valle que se extienden más abajo del nivel de las nieves perpetuas - a modo de lagos de hielo - sobre una zona de tierras bajas donde se produce la fusión.

Por su parte Ahlmann (1948) considera, con base en la forma externa del glaciar, la topografía de su lecho de roca y la extensión y espesor del hielo, tres tipos básicos de glaciares (A, B, C) y sus variantes correspondientes:

A. Glaciares que se extienden como un manto continuo en el que el hielo se mueve hacia fuera en todas direcciones;

1. Glaciares continentales o hielo de tierras interiores, cubriendo un área muy grande.
2. Glaciar de casquete o casquete de hielo, cubriendo un área menor que un glaciar continental.
3. Glaciar de tierras altas, cubriendo la parte central o más alta de una región montañosa.



B. Glaciares reducidos a un cauce más o menos marcado que dirige su movimiento principal. En este grupo se incluyen tanto los glaciares independientes como los desprendidos de un glaciar del grupo A.

4. Glaciar de valle, de tipo alpino.

5. Glaciar coalescente, en el que todo un sistema de valles está más o menos lleno de hielo.

6. Glaciar de circo, localizado en un nicho aislado o en una ladera de la montaña.

7. Glaciar de pared, cubriendo el lado de un valle o alguna parte de él.

8. Lenguas flotantes de hielo.

C. Hielo glacial extendiéndose en láminas pequeñas o grandes, en forma de torta sobre el piso de tierra al pie de las regiones glaciadas. Los glaciares de este tipo no son independientes.

9. Glaciar somontano o situado al pie de una montaña, formado por la unión de la parte inferior de uno o más glaciares independientes de los tipos 4, 5 y 7 del grupo B.

10. Glaciar de base, la porción más baja y extendida de un glaciar de los tipos 4, 5 y 7 del grupo B.

11. Banco de hielo.

Esta clasificación ha sido ampliada por William O. Field (1964) en unas notas de la American Geographical Society, las cuales se resumen de la siguiente manera:

1. Glaciares de cima, aparecen en la cima de una montaña o a horcajadas en una cresta y, por lo tanto, fluyen en más de una dirección. No son extensos y no quedan comprendidos en los casquetes de hielo de tipo A.

2. Glaciares colgantes, son los que ocupan un nicho o una depresión de menor cuantía que un valle en una ladera y parecen estar colgando. El termino no es lo mismo que valle colgante o glaciar ocupando un valle colgante. Existiendo la posibilidad de que exista una confusión.

Muchos glaciares colgantes son muy pequeños y a veces los llaman glacierettes. Este tipo de glaciares puede diferenciarse de los glaciares de pared lateral como los clasifica Ahlmann (B. 7) por encontrarse aislados y tener, por lo general, extensión más limitada que la de una corriente de hielo que baja por un valle.

3. Hielo festoneado o laderas cubiertas de congesa, pueden ocurrir en las laderas cóncavas o convexas; los festones de hielo cubren las laderas amplias de las montañas y en algunos casos se extienden como lenguas por los valles. Las laderas cubiertas por congesa son una posición intermedia entre los campos de hielo y las lenguas de hielo.

4. Glaciares de acantilado, son los glaciares que terminan al borde de un acantilado.

5. Glaciares de cráter, aparecen en los cráteres de volcanes extintos que quedan por encima del limite regional de nieve. En algunos casos el cráter está completamente lleno y el hielo sale en una o más direcciones formando lenguas. Existen casos en los que el hielo surge por uno de los bordes del cráter, hundido o erosionado.

6. Glaciares regenerados o reconstruidos, son glaciares que aparecen por debajo de la línea de congesa y que están alimentados principalmente por avalanchas de los glaciares de las laderas superiores y no por laderas de

avalancha. Por lo general estos glaciares ocupan un circo o un valle y pueden mostrar algunas de las características básicas de estos tipos. El criterio principal para su definición debe ser que la fuente de su alimentación sean las avalanchas de uno o más glaciares.

### ***II.5.2. Clasificación térmica.***

Los glaciares pueden clasificarse de varias formas. La división más útil está basada en la temperatura (Ahlmann, 1935 en Benn y Evans, 1998), reconociéndose tres categorías:

Glaciares templados (o cálidos), en los que el hielo está cerca del punto de fusión, excepto durante el invierno, cuando unos pocos metros superficiales pueden estar muy por debajo de 0°C. El movimiento es principalmente por deslizamiento basal.

Glaciares polares (o fríos), partes del casquete Antártico, que tienen temperaturas muy por debajo del punto de fusión, y el movimiento, que es lento, es en su mayor parte debido a deformación interna del propio hielo.

Glaciares subpolares, que tienen interiores templados y márgenes fríos, por lo que son compuestos.

Ahlmann (1948) toma en cuenta la consistencia de la parte superior del glaciar (congesta o hielo compacto) y la temperatura que domina en el glaciar, para la cual las definiciones son las siguientes:

1. Glaciares templados, consisten en hielo cristalino formado por la recristalización, bastante rápida, del excedente anual de la precipitación sólida debida a grandes flujos de agua. Por todas partes de estos glaciares, las temperaturas corresponden al punto de fusión del hielo, salvo en el

invierno, cuando la capa superior está congelada hasta una profundidad de no más de dos metros.

2. Glaciares polares, consisten por lo menos en sus partes superiores a más altas, de congesa cristalina dura formada por la recristalización lenta del excedente anual de la precipitación sólida acumulada. La temperatura del glaciar, hasta cierta profundidad, es negativa aún en verano. Estos glaciares polares pueden dividirse en:

a. Glaciares polares verdaderos, que consisten en, por lo menos en sus áreas de acumulación, congesa cristalina con temperaturas por debajo del punto de congelación hasta profundidades considerables. Aun en el verano, la temperatura del área de acumulación es tan baja que como regla no hay fusión acompañada de formación de agua.

b. Glaciares sub-polares, los que tienen su área de acumulación formada por congesa cristalina hasta una profundidad de 10 o 20 metros. En el verano, la temperatura permite la fusión en superficie, acompañada de la formación de flujos de agua.

### ***II.5.3. Clasificación dinámica.***

Ahlmann (1948) considera que la actividad dinámica de los glaciares está asociada con el balance de masa y con las características térmicas, la clasificación basada en la actividad dinámica consiste en tres tipos principales:

1. Glaciares activos, que son normalmente alimentados por flujos de hielo continuos a partir de la zonas de acumulación que pueden yacer en la cuencas de los circos o en las mesetas. Los glaciares son alimentados por la acumulación en las mesetas, tal vez en periodos de ablación en donde se presentan las salidas del sistema glacial.

Algunos glaciares activos pueden ser clasificados como regenerados. Estos glaciares son completamente alimentados por hielo proveniente de la caída de avalanchas a partir de las áreas altas de acumulación a las partes bajas, donde la cabeza del glaciar consiste de largos abanicos de avalanchas.

2. Glaciares pasivos, cuando el suministro de nieve que alimenta a los glaciares es pequeño, el hielo llega a ser pasivo. Esto ocurre cuando la pendiente es suave. Similarmente, en áreas llanas o planas en tierras altas, donde falta pendiente el movimiento se inhibe, y el hielo se puede hacer pasivo. El hielo bajo estas condiciones todavía recibe alimentación en forma de acumulación de nieve. Pero el hielo no es dinámicamente activo, por ello no puede describirse como muerto.

3. Glaciares muertos, el hielo muerto no es necesariamente inmóvil de acuerdo con los términos de la definición de Ahlmann (1948). El sugiere que el hielo muerto no recibe suministro a partir de las áreas de acumulación. El movimiento esta restringido ya que depende de la pendiente.

Otra definición de hielo muerto está basada en estas propiedades dinámicas de movimiento. Una masa estática de hielo se describe como muerta. El hielo muerto tiene una semejanza de acuerdo a ambas definiciones para la máxima distancia a partir de las áreas de acumulación en las tierras altas.

El hielo muerto es mas parecido cuando ocurre en tierras bajas donde el flujo es inducido por los factores de la pendiente que son muy pequeños. El hielo en esta situación es como si estuviera estático o muerto desde el punto de vista climatológico. En esta situación, la masa de hielo no recibe grandes acumulaciones excedentes y vive sólo con esta masa, que es lentamente desechada bajo estas condiciones.

Sin embargo, la masa de hielo es considerada dinámicamente muerta después de climatológicamente muerta, porque todavía continúa recibiendo material a partir de la zona de acumulación aunque esto no viene a ser un gran suministro activo. En las grandes capas de hielo esta diferencia en tiempo entre el hielo muerto climatológicamente y el hielo muerto dinámicamente es tal vez similar en miles de años.

### ***II.6. Características morfológicas de los glaciares y de las formas que resultan de su actividad.***

Existen características morfológicas que solamente se presentan en las regiones polares o en las grandes cordilleras; algunas están relacionadas directamente con la presencia de los glaciares y se forman sobre éstos como las grietas, morrenas, ojivas, etc. Pero también hay otras formas y estructuras glaciales, que no necesariamente están relacionadas con la presencia de los glaciares, y se observan con el retroceso o ausencia de los glaciares, tratándose de estructuras sedimentarias formadas por las corrientes de agua de la fusión glacial. Se pueden identificar claramente estos rasgos del relieve terrestre y depósitos sedimentarios, que son característicos de un relieve glacial en aquéllos lugares en los cuales la tierra ya no se encuentra cubierta por el hielo.

#### ***II.6.1. Grietas.***

Un glaciar tiene una corteza externa por lo general delgada, (a veces de más de 30 m de espesor) que se rompe fácilmente, por lo que se comporta como un sólido elástico más que como uno rígido (Sharp, 1988). Esta corteza frágil y más o menos pasiva es arrastrada por el flujo de las partes más profundas; y las deformaciones inducidas que sufre a causa de ello son demasiado rápidas para que en ella se desarrollen con eficacia los procesos de flujo.

Si el hielo sufre una deformación superior a la que puede soportar y libera los esfuerzos extendiéndose, como suele ocurrir, se rompe por medio de

profundas *grietas*. La expansión del hielo, evidencia de la cual son las grietas, se produce allí donde un glaciar pasa por una curva, o sobre un declive de su fondo o se ensancha en un valle ancho o llanura, lo cual origina diferentes tipos de grietas.

Las *grietas marginales*, son resultantes del arrastre diferencial contra las paredes del valle. En un glaciar que tenga una convexidad muy marcada en su fondo se desarrollan muy fácilmente *grietas transversales*. El caso límite son las cascadas de hielo. Aquí, el glaciar se convierte en un caos de bloques en todo su espesor que, no obstante, pronto se reagrupan y vuelven a fluir. Las *grietas longitudinales*, aproximadamente paralelas a la dirección de flujo, se forman allí donde el hielo se extiende lateralmente (Figura 10).

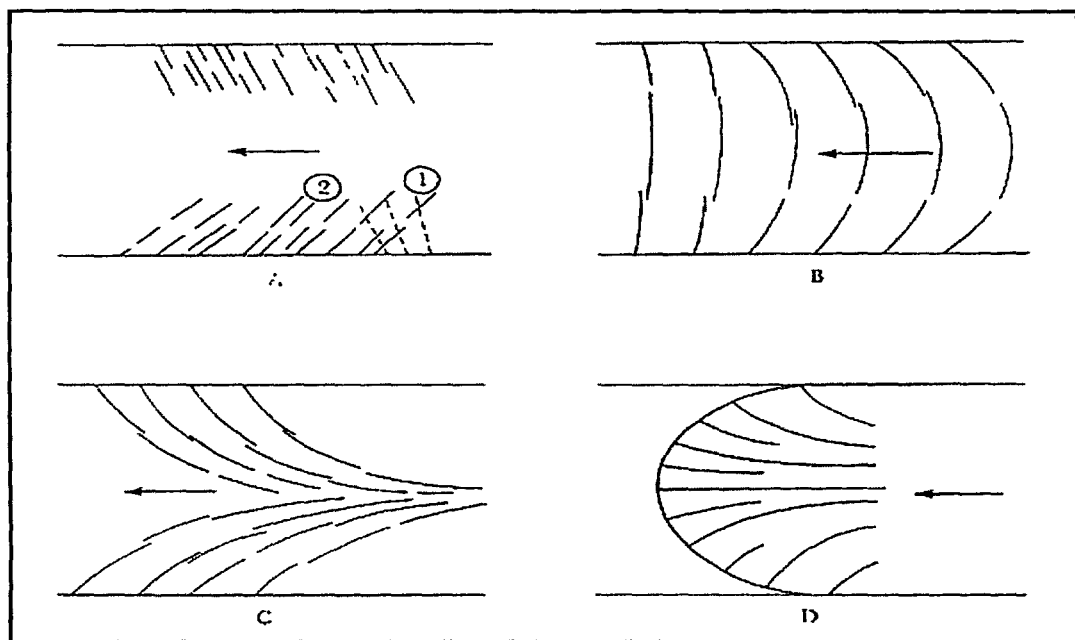


Figura 10. Tipos comunes de grietas en glaciares de valle, (A) marginal, (B) transversal, (C) longitudinal y (D) radial terminal (Sharp, 1988).

Como las grietas son consecuencia del flujo, no son rasgos permanentes; unas se cierran y otras se abren. Debido a la intersección de dos series de grietas, en especial si las grietas de cada serie son muy próximas entre sí, la parte superior del glaciar se rompe en una masa quebrada de pináculos dentados conocidos como *séracs*.

Un tipo especial de grieta que puede ser muy ancha y profunda es la *rimaya*. Se abre en verano cerca de la parte superior del campo de neviza de un circo, donde la cabecera de un glaciar queda separada de las paredes verticales o del hielo adherido a ellas. Con frecuencia, en vez de una grieta ancha y más o menos continua se forman varias de estas grietas.

### ***II.6.2. Morrenas.***

Las morrenas se forman por el depósito y acumulación de sedimentos, derrubios y bloques, que son arrancados y transportados encima, dentro, debajo y alrededor de un glaciar. Los fragmentos de roca provienen de las laderas abruptas situadas por encima de un glaciar, son liberados principalmente por la fragmentación que producen las heladas, se desploman sobre el hielo y son arrastrados por el glaciar activo, dependiendo de la ubicación de los fragmentos es como se les clasifica.

*Morrenas laterales.* Son los fragmentos acarreados, transportados sobre el hielo y que son arrastrados en las margenes del glaciar, se observan como largas filas de derrubios que también se denominan morrenas marginales.

*Morrena central.* Cuando se unen dos lenguas glaciales que proceden de valles adyacentes, las morrenas laterales contiguas de cada uno de ellos se juntan y forman una morrena central en la superficie del glaciar resultante. Así, un glaciar principal alimentado por varios afluentes puede aparecer recorrido por una serie de morrenas centrales compuestas de materiales procedentes de diferentes partes



de la cuenca de alimentación, proporcionando de este modo muestras de rocas que, de no ser por esto, serían inasequibles.

*Morrenas internas.* Cuando parte de los restos de derrubios que se encuentran encima del glaciar caen en las grietas, el material es engullido de este modo por el hielo, lo que constituye las morrenas internas.

*Morrenas de fondo.* Cuando una cierta porción de los derrubios que se encuentran en el interior del glaciar alcanza el fondo, junto con el material arrancado o limado de él, constituye las morrenas también llamadas subglaciales.

*Morrenas profundas.* Si la parte más baja del hielo llega a cargarse tanto de derrubios que ya no los pueda transportar, el exceso se deposita formando este tipo de morrenas, por encima de la cual se desliza entonces el hielo más activo que tiene encima.

*Morrena frontal o terminal.* Todos los variados derrubios, desde los bloques angulosos y cantos rodados hasta los mas finos reducidos a polvo que proceden de la roca del fondo del cauce, al llegar al final del glaciar son abandonados por éste y quedan desordenadamente amontonados cuando se funde el hielo.

Si el frente del glaciar permanece estacionario durante varios años, se levanta una colina arqueada a modo de herradura a la cual se le llama morrena frontal o terminal. Pero si el frente se retira verano tras verano, no llega a formarse esta acumulación. Los derrubios abandonados a partir del frente en retroceso forman entonces una cobertura irregular que se sedimenta sobre la morrena de fondo ya depositada.

### ***II.6.3. Ojivas.***

Formas de hielo en la superficie de un glaciar, a manera de rodillos limitados por surcos, orientados transversalmente al eje del glaciar, que son longitudinales en la periferia del mismo (Figura 11). Las ojivas se forman:

- 1) Ante una velocidad irregular del deshielo.
- 2) Por afloramientos, en la superficie del glaciar, de capas de hielo con diverso grado de fusión.
- 3) Ante la presencia de capas contaminadas de hielo (escamas).

Bandas de la superficie de un glaciar. Normalmente tienen forma convexa hacia la parte baja del glaciar debido a la relativamente alta velocidad de desplazamiento que posee en su parte central. El efecto del bandeado puede ser debido a la alternancia de bandas de hielo blanco (que contiene más burbujas de aire) y negro (con pocas burbujas de aire), o a variaciones en la presión longitudinal (Sharp, 1988).



**Figura 11.** Estructuras bandeadas de ojivas en una lengua en el glaciar de Patmore en la Columbia Británica (Izquierda), y en el glaciar Gerstle en Alaska (Derecha) (Sharp, 1988).

#### ***II.6.4. Otras formas y estructuras glaciales.***

Las características glaciofluviales del relieve terrestre son producidas por corrientes de agua de fusión glacial. Estas corrientes se forman sobre la superficie del hielo y a lo largo del lecho bajo el glaciar. Algo del sedimento transportado por estas corrientes se deposita en depresiones sobre la superficie del glaciar, a lo largo del lecho y contra las márgenes del glaciar.

De estos depósitos, se forman con el tiempo las características de contacto de hielo; dichos depósitos se acumularon parcialmente contra una superficie de hielo. Algo del sedimento es desplazado de la masa de hielo por corrientes de agua de fusión. Los rasgos de deslave se forman por la depositación de estos detritos. Las características de contacto de hielo y de deslave muestran estructuras sedimentarias que indican que el sedimento se depositó en pequeños lagos y a lo largo de lechos de las corrientes (Figura 12).

Algunas de estas formas y estructuras que son las más características se describen a continuación:

*Drumlins*, son colinas alineadas por la corriente, de forma alargada en la dirección del movimiento del hielo. Estos son tallados por una combinación de depósitos de transporte glacial y lecho rocoso o totalmente por depósitos de transporte glacial.

*Bloques Erráticos*, los glaciares transportan grandes cantos que se depositan, los cuales se denominan bloques erráticos.

*Eskers*, estos se encuentran en las regiones glaciadas, crestas sinuosas de depósito estatificados de transporte glacial. Estas crestas son características del contacto de hielo que son los llamados éskers.

*Kames*, los montes de depósitos estratificados de transporte glacial conocidos como kames son otro tipo de característica del contacto de hielo. Los kames parecen haberse producido a partir del sedimento que se depositó en depresiones sobre la superficie de la zona de ablación o como conos aluviales a lo largo de la margen glacial.

*Marmitas*, depresiones locales en forma de fosa en un terreno de tilita y depósito estratificado de transporte glacial el cual se denomina marmita. En algunos lugares se encuentran los llamados lagos de marmita sobre estas depresiones.

*Arrugas y pliegues*, cuando un glaciar queda sometido a compresión lateral al pasar por un estrechamiento del valle se producen *arrugas y pliegues* de presión del hielo análogos.

*Mesa de glaciar*. Las lajas aisladas de rocas o los montones de derrubios de la superficie pueden ser suficientemente calentados por el sol como para derretir el hielo que tienen debajo. Sin embargo, los bloques mayores sirven de protección contra los rayos solares, y al fundirse el hielo a su alrededor quedan aislados formando una mesa de glaciar posada sobre una columna de hielo.

*Muelas glaciales*. Cuando el tiempo es soleado, la superficie del glaciar puede diversificarse con charcas y arroyos que se reúnen en cursos de agua y que en general caen por las grietas. Por una combinación de fusión y formación de cuevas por el mismo mecanismo que produce las marmitas de gigante (con la ayuda de arena y cantos), en el hielo fisurado se modelan profundas calderas, llamadas muelas glaciales o molinos, y el agua puede escaparse hacia el frente del glaciar y por un túnel.

*Nunataks.* Se relacionan con los mantos continentales de hielo, el inmenso peso deprime isostáticamente el fondo rocoso sobre el cual yacen, al desaparecer el hielo adopta una forma de plato o cuenco, y partes del cual se encuentran ahora bajo el nivel del mar. Hacia los bordes, los picos más elevados y las cordilleras sobresalen del hielo formando los nunataks.

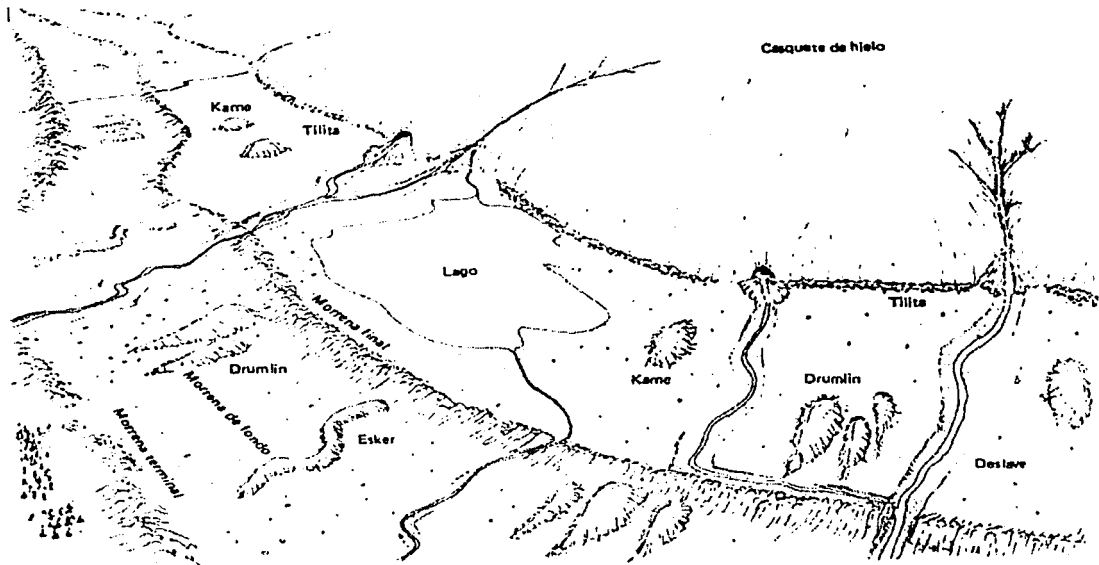


Figura 12. Formas y estructuras glaciales (Robinson, 1990).

### III. ESTUDIOS DE DINAMICA GLACIAL

La determinación de la velocidad en la superficie del hielo nos permite conocer la migración de los glaciares, la instalación de estacas por diferentes procesos sobre la superficie de un glaciar ha sido utilizada en forma exitosa en el estudio de diversos aspectos de los glaciares: determinación de áreas, detección de cambios morfológicos en la superficie de glaciar, estimación del balance de masa y tasas de movimiento. Posteriormente el monitoreo regular de las estacas desde posiciones fijas con diferentes métodos geodésicos revela cambios en la velocidad de flujo debidos a la estación, en respuesta al clima (temperatura, precipitación). Estas mediciones y el procesamiento de los datos obtenidos nos dan indicios de que la velocidad del movimiento puede variar considerablemente de un glaciar a otro, estos procesos en conjunto son llamados estudios de dinámica glacial.

#### *III.1. Instalación de estacas.*

Las variaciones que presentan los glaciares pueden cuantificarse con el objeto de establecer el comportamiento de éstos a mediano y largo plazo. Estas variaciones tienen relación directa con el clima regional y mundial, sin embargo, debe considerarse el posible impacto en el clima regional de la zona del volcán Iztaccíhuatl, esto se puede determinar por medio de la instalación de estacas.

El mejor material para las estacas es probablemente el aluminio en forma de tubo Østrem y Brugman (1991), y el bambú, pero existen algunas desventajas en la utilización entre ambos, como la diferencia de costos, la resistencia a las condiciones extremas de las tormentas, humedad, la fácil identificación sobre la superficie del glaciar y en condiciones de niebla o mal tiempo. Las estacas de metal tienen mayores ventajas en áreas de extrema humedad, las estacas de

aluminio son remplazadas por estacas de acero o torres especiales para soportar condiciones de mayor corrosión.

En algunos glaciares de diferentes partes del mundo, se utilizan estacas de aluminio de diámetros especialmente diseñados para ser más resistentes a las condiciones climatológicas que ahí imperan, particularmente en lugares donde la nieve es arrastrada por fuertes vientos que tienden a doblarlas y desenterrarlas. El tamaño óptimo de las estacas es de 4 a 6 metros de longitud, de un diámetro de 32 mm, y con espesor de las paredes de aproximadamente 2 mm; si se requiere que sean mas fuertes para soportar una mayor tensión producida por el desplazamiento del glaciar, el espesor de las paredes debe ser mayor, aproximadamente 3 mm.

Antes de que una estaca sea insertada en el glaciar, puede ser marcada alrededor de su circunferencia y pintada dos metros a lo largo, para facilitar la lectura después de que la estaca ha sido insertada en el hielo. Las estacas se pueden instalar en un perfil longitudinal, a lo largo de la línea central del glaciar y similarmente en perfiles transversales localizados en intervalos a través del glaciar a partir de un extremo a la parte frontal del área de acumulación de la nieve anual. Las áreas de grietas y otras partes con dificultades en el glaciar (como una pendiente muy pronunciada, formación de penitentes, seracs, caída de bloques, etc.) deben de considerarse para la instalación y localización de las estacas por razones de seguridad. Sin embargo, en lugares con fusiones muy grandes en áreas de grietas, se debe tratar de poner una o dos estacas en estos lugares para observar el incremento de la ablación.

Este sistema general de distribución, es usado en muchos glaciares de valle, y puede ser modificado para glaciares que tienen una topografía más complicada, y para capas de hielo. La idea básica, es por supuesto, colocar estacas que sean representativas (que muestren un movimiento significativo,

indiquen la ablación, acumulación, etc.) de esa parte del glaciar donde son puestas.

Se puede utilizar un sistema de numeración, por si las estacas desaparecen o existen malas condiciones climáticas, que dificultan la navegación en el glaciar para la localización de las estacas, un buen sistema de numeración hace más sencillo saber donde se encuentran éstas. Para identificar mas fácilmente el lugar de las estacas, es necesario tener un sistema lógico de numeración.

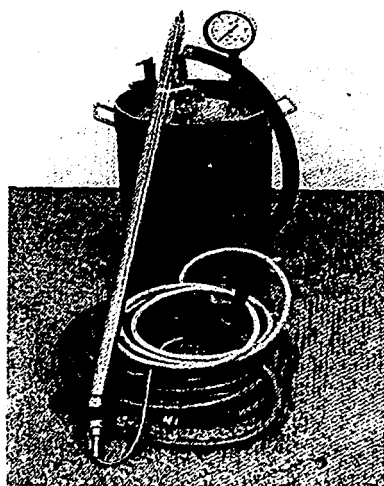
Las estacas deben ser instaladas verticalmente sobre la superficie del glaciar: Las técnicas usadas para esto dependen del tipo de superficie donde las estacas son localizadas. En general, hay dos diferentes maneras de insertar las estacas.

En el área de acumulación de la nieve anual, las estacas pueden ser simplemente empujadas dentro de la nieve, pero recientes investigaciones (Østrem y Brugman, 1991), han mostrado que las estacas tienden a hundirse o caer en el glaciar durante la estación de fusión, por ello los extremos inferiores de las estacas deben de soportar este movimiento y para prevenir que éstas se caigan, se puede colocar un recipiente o bote vacío e inclusive un trozo de madera en la parte inferior de la estaca que sirve como ancla, y permite mejor estabilidad y firmeza de la estaca en el glaciar cuando ésta es colocada.

En el área de ablación, las estacas pueden ser puestas sobre la superficie del glaciar, perforando un agujero reducido con una perforadora de hielo (manual, con motor u operada mecánicamente), con una perforadora de punta caliente (*hot point drill*) (Figura 13) que utiliza un chorro de vapor a presión, (el cual se obtiene con un calentador de gas propano) o con una perforadora que utiliza un chorro de agua caliente (*hot water drill*).



El agujero perforado puede tener un diámetro de 3 a 4 cm, y en algunos casos de 10 a 20 cm de profundidad, son suficientes para colocar la parte más pequeña de la estaca en el glaciar extendiéndose la parte restante, sobre todo en el comienzo de la estación de ablación, porque la estaca con la fusión del hielo tiende a hundirse, pero si se perfora en el final de la estación de ablación, es necesario que las estacas se extiendan aproximadamente 200 a 250 cm por encima de la superficie del glaciar.



**Figura 13.** Perforadora de punta caliente que utiliza un chorro de vapor (Østrem y Brugman, 1991).

En algunos países se han utilizado estacas de madera, pero éstas muchas veces no proporcionan datos muy confiables por que tienden a flotar en el agua que se funde dentro del agujero en el cual se encuentran insertadas, incluso si estas son empujadas de vuelta en la misma posición, las lecturas de las estacas no son precisas por el agua de fusión que tiende a acumularse de esta manera dentro del hielo debajo del glaciar durante la estación de verano. Consecuentemente, las lecturas de las estacas pueden ser menores y no indicar la ablación glacial verdadera.

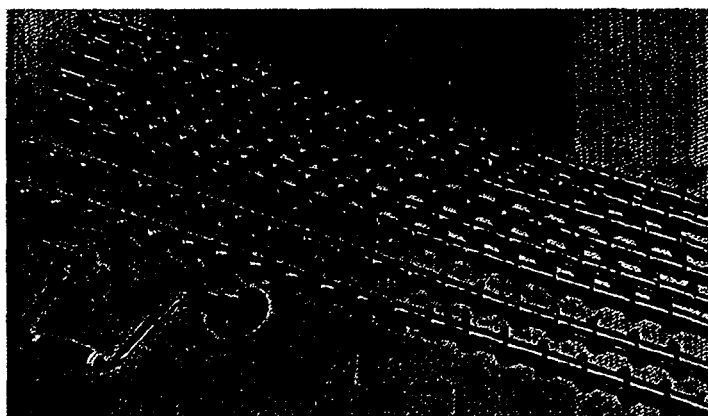
Se pueden presentar condiciones similares a las anteriores descritas para las estacas de metal cuando llegan a perderse en la estación de verano. Esto normalmente pasa si menos de 1-1.5 m de la estaca queda en el hielo sólido. Generalmente, las lecturas de las estacas son confiables sólo cuando éstas son congeladas solidamente en el hielo. Para los estudios de movimiento glacial estas mediciones son extremadamente importantes. Es bastante la precisión (de cm o mm) que se requiere para las mediciones, por ello es importante tomar precauciones especiales para asegurar la precisión del cálculo de las nuevas posiciones.

Se usan varias perforadoras operadas manualmente, la más simple consiste de un tubo de 1 ½" de metal con 4 o 6 dientes puntiagudos cortados en la parte baja al final del tubo, con extensiones hechas de aluminio de 5/8" y un brazo para operarla, con los que se pueden perforar agujeros de aproximadamente 4 m de profundidad en un par de horas. Generalmente se utiliza alcohol para evitar que el hielo se congele en el agujero al estar perforando. El peso del set completo es aproximadamente de 10 kg. Actualmente este tipo de perforadora ha sido reemplazada por una perforadora que emplean los pescadores y tiene mas ventajas en su utilización. El uso de las perforadoras manuales en algunos casos es un arte, porque se requiere cierta destreza en su operación y depende mucho de las condiciones del hielo y de la temperatura del aire.

Otros tipos de perforadoras se han desarrollado en los últimos años. La perforadora helicoidal tienen cuchillas de corte horizontal y junto con un largo espiral, que libera los fragmentos de hielo (Figura 14). Cuando el hielo glacial es bastante húmedo, este tipo de perforadora puede tener algunas ventajas, aunque a veces los fragmentos de hielo sobre la superficie puede dificultar la perforación. Es siempre más aconsejable perforar los agujeros cuando el hielo está totalmente congelado y que no exista en la superficie agua de fusión del hielo que pueda percolar dentro del agujero. Sin embargo, si la temperatura del aire es cercana a 0°C, o la luz del sol es muy fuerte, la perforadora puede templarse y congelarse en

el agujero porque el hielo tiene menor temperatura. Bajo estas condiciones, es mejor perforar de noche.

En áreas remotas donde los glaciares son visitados después de largos intervalos de tiempo o en glaciares donde la fusión del hielo es mayor a 4 m, es aconsejable usar una perforadora de punta caliente (*hot point drill*), para colocar una cadena de estacas y evitar volver a perforar hasta la estación de fusión del hielo. Este tipo de perforadoras es muy eficiente con una velocidad de perforación de 10 m/h en el hielo glacial, pudiéndose alcanzar de 10 a 15 m de profundidad, más del doble que en la nieve o área de acumulación.



**Figura 14.** Perforadora helicoidal de tipo manual utilizada en los glaciares para colocar las estacas (Østrem y Brugman, 1991).

Recientemente, perforadoras de hielo similares se han estado desarrollando, de diferentes pesos y complejidad. Este tipo de perforadoras son eficientes para usarse en el campo ya que son fáciles de transportar.

TESIS CON  
FALLA EN ORIGEN

### **III.2. Métodos geodésicos.**

#### *Teodolito Electrónico.*

El primer paso para la medición del movimiento o cambio de posición de las estacas, es el establecimiento de una estación y una referencia, los cuales son puntos que se determinan en campo, considerando que exista intervisibilidad entre los dos y al mismo tiempo que se tenga buena ventana de visión hacia los puntos que se van a radiar a partir de ellos. Los puntos de estación y referencia deben de ser establecidos firmemente en el terreno, con un tornillo, una placa, una varilla, y tener encima una marca como una perforación o prominencia no mayor a una punta de lápiz, para garantizar que cada vez que se haga estación en uno u otro punto, sea en la misma marca.

*El montaje del teodolito sobre la marca de la estación se denomina Centrado y Nivelado, y en este documento se describe el procedimiento llamado Método Swendener para centrado y nivelado simultáneo.*

El primer paso es abrir el tripié y levantarlo aproximadamente a la altura del diafragma del operador, colocar la base nivelante con plomada óptica y mover todo el conjunto para que la base quede aproximadamente sobre el punto. Se clava en el suelo una pata cualquiera contraria a la persona que realiza la operación, la cual toma las dos patas restantes y las mueve angularmente mientras observa a través del ocular de la plomada óptica hasta que vea coincidir la retícula de la plomada con la marca en el suelo. En este momento, debe clavar también las dos patas restantes en el terreno.

Enseguida, moviendo los tornillos de la base nivelante, debe centrar perfectamente la retícula sobre la marca, sin importar por el momento la nivelación de la base. Cuando se consiga el centrado, debe ahora sí proceder a la nivelación, la cual se efectúa observando el nivel circular de la base y determinando con cuál pata hace línea la burbuja. Enseguida se afloja el tornillo central de la pata elegida,

y debe subirse o bajarse dicha pata sin desclavarla del piso, hasta que la burbuja quede en línea con otra pata o que quede finalmente centrada dentro del nivel.

La operación de nivelado por lo común mueve un poco el centrado, por lo que debe repetirse el proceso (desde el centrado con los tornillos de la base) hasta que la base quede simultáneamente centrada y nivelada. En realidad, si se llega a un estado muy próximo al centrado y nivelado perfecto, la operación se completa más sencillamente nivelando ahora la burbuja con los tornillos de la base, y el centrado se hace aflojando un poco el tornillo sujetador de la base, para mover ésta sin girarla, y hacerla coincidir con la marca.

El siguiente paso consiste en la nivelación del teodolito sobre la base nivelante, operación que se consigue poniendo el teodolito sobre ésta, apretando el tornillo "intocable", y luego se gira el teodolito hasta hacer coincidir el nivel tubular frontal con dos de los tornillos de la base.

Enseguida, se giran estos dos tornillos simultáneamente, pero en sentido opuesto uno del otro, hasta que la burbuja se coloque dentro de las dos marcas del nivel tubular. Cuando se consiga esto, debe observarse el nivel tubular lateral, el cual se nivela con el tornillo restante de la base, hasta que esta burbuja quede también centrada entre las marcas del nivel.

Es necesario aclarar que la nivelación del teodolito debe efectuarse teniendo ya instalada la batería, y preferiblemente, también el distanciómetro, pues el ponerlos o quitarlos afecta la nivelación. El distanciómetro se monta sobre el teodolito, quitando previamente el asa de la parte superior de éste, y atornillando aquél en su lugar.

El teodolito electrónico *Sokkia* DT5 es un instrumento para mediciones angulares tanto verticales como horizontales, y su unidad de medición puede ser

modificada según sea requerida, en grados sexagesimales o en el llamado *gon*, o grado centesimal (<sup>g</sup>), esto es, existen 400<sup>g</sup> en una circunferencia, los que corresponden a 360° sexagesimales (un cuarto de circunferencia, por ejemplo, equivale a 90° sexagesimales y a 100<sup>g</sup>).

Las fracciones de *gon* son decimales, y pueden leerse en este teodolito hasta en milésimas de *gon*, tanto para los ángulos horizontales como para los verticales (Figura 15).

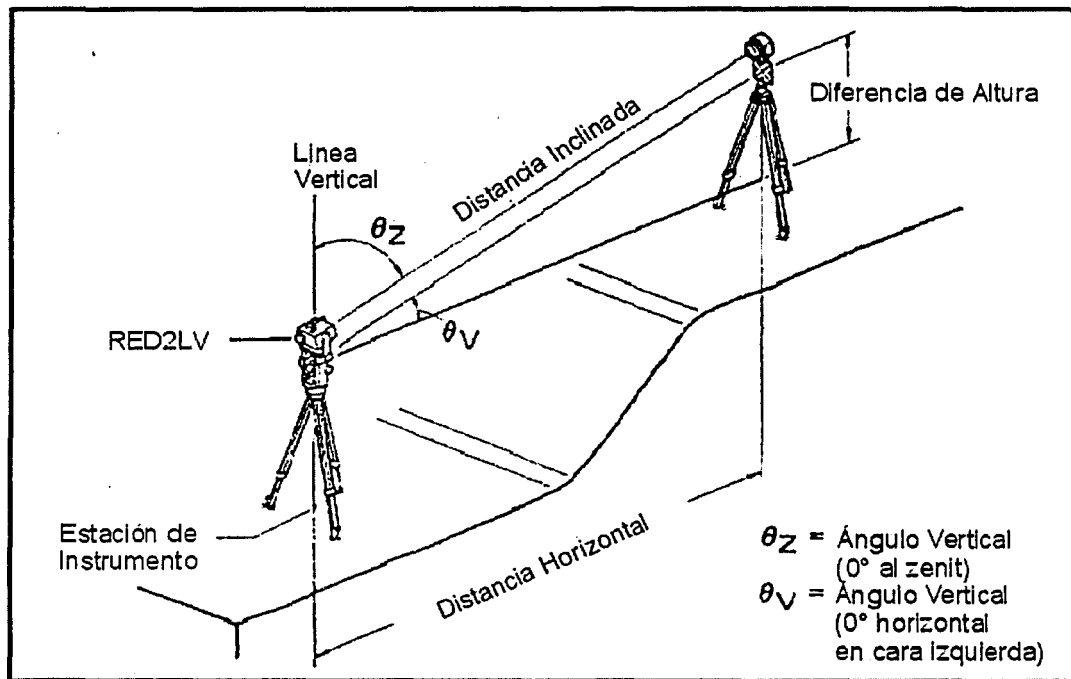


Figura 15. Teodolito electrónico Sokkia DT5 es un instrumento para mediciones angulares, tanto verticales como horizontales (Sokkia Co., 1995).

### Distanciómetro (electronic distance meter, EDM).

Uso del distanciómetro Red2LV (instrumento electrónico para la medición de distancias, IEMD) o *electronic distance meter* (EDM por sus siglas en inglés). El distanciómetro se monta sobre el teodolito, para la toma de distancias hacia los prismas. El montar el distanciómetro sobre el teodolito garantiza que la línea vertical de su retícula coincide con la línea vertical del teodolito, hecho conocido como Ajuste Horizontal del distanciómetro; sin embargo, a veces es necesario un pequeño ajuste apuntando al mismo punto con los dos instrumentos y enseguida moviendo simultáneamente los dos tornillos de ajuste horizontal de la base del distanciómetro, para lograr que la línea vertical se mueva hacia la derecha o izquierda, hasta que coincida con la del teodolito. Es conveniente hacer esto en el momento de la toma de referencia inicial (Figura 16).

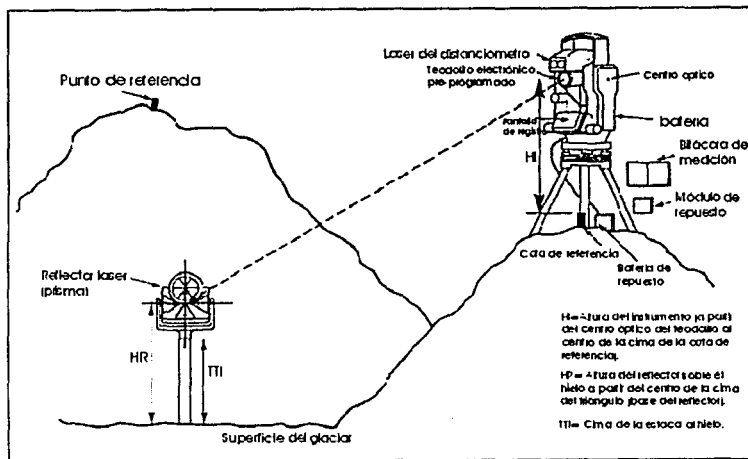


Figura 16. Distanciómetro Red2LV apuntando al prisma previamente instalado para la medición de la distancia, por medio de la reflexión del rayo infrarrojo que emite el aparato (Østrem y Brugman, 1991).

### Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

El sistema de posicionamiento Global (GPS), es una constelación de satélites que conforman el proyecto NAVSTAR (*Navigation Satellite Time And Ranging*). Es un sistema de medición que provee posicionamiento tridimensional,

de navegación y hora de forma continua y en tiempo real en todo el mundo. Entendiéndose como posicionamiento, la obtención de las coordenadas geográficas (u otro sistema de referencia), basado en la observación de señales de radio del sistema GPS del Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) (Wolf y Brinker, 1998).

Las observaciones son procesadas para determinar la posición de la estación en un sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) con centro terrestre, las cuales pueden ser convertidas a coordenadas geodésicas (latitud, longitud, altura) con respecto al elipsoide de referencia, el Sistema Geodésico Mundial ITRF97. (*International Terrestrial Reference Frame*, 1997) un sistema geocéntrico definido por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra, basado en el WGS84 propuesto por la Asociación Internacional de Geodesia). Con adecuada conexión del geoide y la altura orthométrica (altura sobre el nivel del mar), pueden calcularse puntos de elevaciones desconocidas.

El bloque completo de satélites, permite observaciones 24 horas continuas bajo cualquier condición climática. GPS es un sistema de recorrido en un sólo sentido; la onda a medir es transmitida por el satélite, moviéndose a través del espacio, y el receptor GPS con su antena recibe la señal; el software en el receptor asigna un tiempo determinado para el dato, y el software en el computador, corrige errores del reloj y las demás ambigüedades en las fases.

GPS es un medio excelente para medir distancias. Dos receptores GPS ubicados en dos puntos (uno conocido o ambos desconocidos), observando el satélite al mismo tiempo, nos darán una buena precisión en la medición, sin tener en cuenta el terreno o distancia entre las dos estaciones.



Los elementos principales del sistema GPS está conformado por tres segmentos:

- Segmento Espacial.
- Segmento de Control o Terreno.
- Segmento Usuario.

*Segmento Espacial:* Esta conformado por una constelación de satélites en órbita alrededor de la Tierra equipados con transmisores de radio frecuencia y relojes atómicos del sistema denominado NAVSTAR, que brinda información geográfica constantemente a los receptores que se encuentran operando en tierra. El sistema se compone de 24 satélites que desde 1995 se declarara totalmente operacional al usuario no militar. En la actualidad se encuentra completa toda la constelación lográndose un cubrimiento de posición en 3D las 24 horas en cualquier parte del mundo.

*Segmento de Control o Terreno:* Lo componen 5 estaciones terrenas, una de control maestra (MCS) en la Base de la Fuerza Aérea Falcón en *Colorado Springs*, Colorado y cuatro más de monitoreo localizadas en Hawaii, Isla Ascensión, Diego García y Kwajalein que localizan a los satélites y les brindan la información georeferencial, para efectos de alimentar sus bases de información, que luego serán transmitidas a los receptores en forma conjunta con otros datos. Estas estaciones de seguimiento están regularmente espaciadas en longitud y tienen coordenadas muy precisas, por ello se encuentran distribuidas estratégicamente en todo el mundo.

La precisión nominal de las efemérides permite la determinación de la posición de un satélite con un error menor de 1 m en sentido radial, 7 m a lo largo de la trayectoria y 3 m transversalmente. Es claro que las órbitas extrapoladas ofrecen necesariamente una determinación residual mayor.

La precisión final alcanzable depende de la exactitud de las efemérides, por lo que es posible utilizar efemérides calculadas a posteriori, que son llamadas efemérides precisas (u órbitas precisas) obtenidas por observación de los satélites desde lugares posicionados con sistemas VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) o SLR (*Satellite Laser Ranging*).

*Segmento Usuario:* Este segmento es el que se comercializa; consta de los receptores utilizados para determinar las coordenadas de un punto, realizar navegación u obtener el tiempo y del software de post-proceso, que se encargará de realizar los ajustes necesarios de la información recibida de los satélites, ya que esta información se transmite en forma de ondas de radio, y sometida a los efectos ionosféricos y de diversas efemérides satelitales, así como a continuas degradaciones de la señal, que por razones de seguridad, son manejadas por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, (Wolf y Brinker, 1998).

Actualmente existen en el mercado una gran variedad de receptores que se diferencian básicamente en la capacidad de utilizar los códigos *C/A* (*Coarse Acquisition o clear acquisition*) o *P* (*Precise*), de recibir en una o dos frecuencias (L1 y L2) y en el número de canales que pueden recibir (lo que se refleja en el número de satélites que se pueden usar simultáneamente).

Los diferentes métodos de medición que se pueden lograr con estos equipos son también una de sus características importantes.

Entre ellos tenemos:

- Método Estático.
- Método Cinemático.
- Método Estático Rápido.
- Método *Stop and Go*, etc.

En el *método estático*, con dos o más unidades GPS de recepción de señales del mismo satélite al mismo tiempo, un receptor GPS está siempre posicionado en un punto conocido (coordenadas locales o WGS84), y la otra unidad en el punto desconocido. Este período de observaciones es llamado *sesión*.

Cuando los dos puntos desconocidos en la primera sesión se vuelven conocidos, una unidad permanece en un punto conocido, mientras los otros son ubicados en otros puntos desconocidos para la sesión 2, etc. Las observaciones son procesadas para obtener las componentes del vector de la línea base entre observaciones (dx, dy, dz) de las estaciones. La diferencia de coordenadas entre el receptor del (los) punto(s) desconocido(s), puede ser determinado a una precisión de 1:1,000,000 o mejor.

Un mínimo de 4 satélites deberán ser visibles al mismo tiempo para obtener mediciones (3 trabajarán, para control horizontal únicamente).

El número de puntos que pueden ser establecidos en un día con este método, está determinado por el número de receptores usados, la precisión requerida y el tiempo de recorrido entre puntos. A mayor número de receptores, mayor número de productividad; por ejemplo, 2 unidades dan 2 nuevos puntos, 4 unidades dan 3 nuevos puntos, etc. En general, un mínimo de 30 minutos de tiempo de observación, es requerido cuando se usa el método estático.

En el *método cinemático* (en movimiento), el tiempo de observación por punto es reducido a 45 segundos, pero la precisión alcanzada será la misma, como en el método estático. Con el método cinemático, después que los puntos de la línea base inicial son determinados, una unidad permanece estática, mientras que las otras unidades van de un punto a otro, sin perder el contacto de mínimo 4 satélites, 28 puntos por hora, usando un receptor en movimiento, no es extraño en el caso de mediciones cinemáticas.

Los demás métodos son una combinación de los anteriores, cambiando básicamente el tiempo de observación. La planeación y programación cuidadosa del trabajo es importante para obtener costos y mediciones más efectivas con GPS. Una planeación previa es necesaria para superar sitios de obstrucciones, evitar ciclos de errores (intervalos en los datos causados por la interrupción de la señal), entre la antena y los satélites, y observar tantos puntos como sea posible, (Wolf y Brinker, 1998).

Según la utilización que se les dé, los sistemas GPS se pueden clasificar en 3 tipos:

- Navegación.
- Integrados a SIG.
- Geodésicos y Topográficos.

*Navegación:* Son equipos que funcionan en forma autónoma y que presentan precisiones de 5 metros; pueden darle posición espacial en 3D, si por lo menos captan 4 satélites. Sus aplicaciones son bastante amplias; entre ellas, el turismo de aventura, navegación aérea, terrestre, marítima, ubicación de zonas arqueológicas, etc.

*Integrados a SIG:* Estos equipos presentan un soporte de software, que permite ajustar los datos de posición recibidos por un método de corrección diferencial, así como planear las mejores geometrías satelitales para periodos de observación más precisos. Se caracterizan por su almacenamiento de datos y sus funciones de formatos para archivos *DXF* o *RINEX*, sus precisiones están entre 1 y 5 metros.

*Geodésicos y Topográficos:* En esta generación se encuentran los de más alta precisión, que van desde  $\pm(50cm+1ppm)$  hasta  $\pm(5mm+1ppm)$ , para trabajos que requieren mediciones muy exigentes, (Wolf y Brinker, 1998).

Adicional al trabajo que se pueden realizar con ellos, viene un soporte de software que sintetiza y ajusta en cuestión de minutos los datos obtenidos a partir de un satélite, con la posibilidad de vistas gráficas y de editarlas con sus propias herramientas de diseño.

### ***III.3. Monitoreo glacial.***

Los glaciares avanzan y retroceden en respuesta a cambios en el clima, sin embargo, la relación no es tan sencilla como se asume generalmente (Paterson, 1994). Los glaciares y sus variaciones son excelentes indicadores del clima en una región, por lo cual es muy importante su estudio. Para esto, se necesita un análisis previo de las condiciones climáticas de la zona así como sus variaciones para después comparar estas fluctuaciones glaciales.

Entre los factores que pueden provocar variaciones climáticas en una región se encuentran, altitud, topografía, grado de deforestación, contaminación atmosférica, cercanía a grandes centros urbanos o bien la presencia de actividad volcánica. Como es el caso del volcán Popocatepetl y su cercanía con el Iztaccíhuatl.

Otros aspectos relacionados íntimamente con las variaciones climáticas de nuestro país son los fenómenos El Niño y La Niña, estos fenómenos son causados por un disturbio en el sistema océano-atmósfera en el Pacífico Tropical del sur, el cual afecta los regímenes de lluvia del verano e invierno. La respuesta de los elementos del clima hacia estos factores se manifiesta en la elevación o disminución respectivamente de la temperatura y precipitación.

Los efectos de las variaciones climáticas, pueden ocasionar cambios de masa en los glaciares. Los cambios climáticos pueden tener repercusiones serias

a nivel local y regional, y los primeros en responder a los cambios, son los glaciares.

Las variaciones climáticas, además de ser indicadoras del deterioro ambiental de una zona y tener una repercusión en el ámbito regional, pueden estar relacionadas con el cambio climático a escala mundial, ya que desde 1880 la temperatura se ha incrementado en aproximadamente 0.5°C. Existen algunas señales que sugieren que la atmósfera del planeta se está calentando, como lo atestiguan los datos climatológicos de miles de registros en los últimos cien años.

Además, en algunos años de la década de los 90's se observaron las temperaturas promedio más altas del siglo XX para el planeta. Aún cuando 1999 resultara más fresco que 1998 (el más cálido del siglo) estaremos presenciando una tendencia clara hacia un calentamiento en los últimos 20 años (Jáuregui, 2000). Esta tendencia no ha permanecido constante a lo largo del siglo XX, el calentamiento ha ocurrido sobre todo antes y después de un período de enfriamiento a mitad del siglo. Es evidente que la temperatura ha aumentado en el siglo XX y la tendencia se ha acelerado al final del siglo (Gutzler, 2000).

Mediante el estudio de elementos del clima, como la temperatura y la precipitación, se pueden identificar variaciones climáticas regionales y su relación con el cambio climático global. Esta información usada en conjunto con la información glaciológica permite reconocer los efectos del cambio climático en los glaciares de la zona bajo estudio.

En México, la información climática se puede describir como insuficiente ya que no hay forma de conocer la calidad de las mediciones. Se sabe que existe un deterioro en las actividades relacionadas con la lectura, registro, organización y almacenamiento de las mediciones, así como con el procesamiento periódico de la información. Por otro lado, debido al tratamiento estadístico de los datos y la utilización, los distintos parámetros varían dependiendo de cada autor. En función

de esto, las comparaciones entre datos regionales y datos de variaciones climáticas a escala mundial resultan complejas.

#### **III.4. Procesamiento de datos geodésicos.**

Los datos geodésicos básicos de la medición de las estacas que se deben registrar en la bitácora de medición y que se obtuvieron en campo, el 4 de Mayo y 29 de noviembre de 1998, son principalmente:

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <i>EST o ST</i>                  | estación.   |
| <i>PV</i>                        | punto visado o medido (referencia, punto en estudio, etc.).                       |
| <i>&lt; V</i>                    | ángulo vertical en grados sexagesimales o en <i>gones</i> .                       |
| <i>&lt; H</i>                    | ángulo horizontal en grados sexagesimales o en <i>gones</i> .                     |
| <i>d /</i>                       | distancia inclinada o directa entre el distanciómetro y el prisma, en metros.     |
| <i>Alt P o <math>\Phi</math></i> | altura del prisma sobre el punto medido, en metros.                               |
| <i>Temp. o T</i>                 | temperatura en grados centígrados.  |
| <i>Mbar o P</i>                  | presión en milibares (hectopascuales).  |
| <i>D, I</i>                      | lectura en cara 1(D), lectura en Cara 2 (I).                                      |
| <i>Alt T o Á</i>                 | altura de instrumento desde la estación hasta el centro del teodolito, en metros. |
| <i>OBS</i>                       | observaciones.  |

Con el procesamiento de estos datos básicos se complementa la bitácora de medición y se obtienen así los datos necesarios para el cálculos de las demás variables que nos interesa conocer (componente de movimiento, tasa de movimiento, etc.), dentro de estos datos complementarios se encuentran:

El *ángulo horizontal corregido* ( $H_{corr}$ ), que se obtiene por medio de la suma de una constante ( $c$ ), la cual es el complemento del ángulo que se obtuvo; posteriormente se obtiene el *ángulo horizontal promedio* ( $H_{prom}$ ) de la serie tomada, y se transforma en radianes; para el *ángulo vertical* ( $V$ ) se realiza un proceso similar:

$$H_{corr} = c + H$$

$$V_{corr} = c + V$$

Para la *distancia (d)* se obtiene un promedio de la serie y se corrige: el promedio de la distancia ( $\bar{d}$ ) más el mismo promedio por *ppm* del instrumento entre  $1 \times 10^6$ . Se obtiene también la *distancia por la altura (d<sub>Alt</sub>)*, la cual es la distancia corregida por el *seno del ángulo vertical (V)* en radianes:

$$d = (\bar{d} + \bar{d} * (\text{ppm} / 1 \times 10^6))$$

$$d_{Alt} = d * \text{sen} V$$

donde:

$\bar{d}$  = distancia

$\bar{d}$  = promedio de la distancia

*ppm* = partes por millón

$d_{Alt}$  = distancia por la altura

$V$  = ángulo vertical

La *altitud del punto visado (PV<sub>Alt</sub>)*, resulta de la suma de una constante ( $c$ ) más la suma de la altura del instrumento ( $\hat{A}$ ) y la distancia por la altura ( $d_{Alt}$ ) todo menos la *altura de referencia (Alt<sub>Ref</sub>)* tomada:

$$PV_{Alt} = (c + \hat{A} + d_{Alt}) - \text{Alt}_{Ref}$$

La *presión (p)* tomada se transforma en *mmHg* por la formula:

$$p = (\text{pbar} * 1.013 / 1000) * 760$$

Las *partes por millon (ppm)* del instrumento se obtienen de la siguiente manera:

$$\text{ppm} = 279 * (1 - (p/720) + (T/270))$$

donde:



$p$  = presión en mmHg

$T$  = temperatura en °C

La *distancia horizontal* ( $d_{Hor}$ ) se obtiene así:

$$d_{Hor} = d_{corr} * \cos(V + ((\hat{A} - Alt_{Ref}) - (Alt_{Dist} - Alt_{Prism})) * \cos(V)) / (d_{corr})$$

donde:

$d_{corr}$  = distancia corregida

$V$  = ángulo vertical

$\hat{A}$  = altura del instrumento

$Alt_{Ref}$  = altura de referencia

$Alt_{Dist}$  = altura del distanciómetro

$Alt_{Prism}$  = altura del prisma

Estos datos complementan cálculos y bitácora de medición obtenida en campo. En un primer procesamiento se describe como se obtienen las demás variables, las cuales nos permiten conocer cómo se comportan las estacas en el glaciar.

#### **III.4.1. Cálculo de las variables en las mediciones de movimiento de estacas.**

*Distancia Horizontal:* se obtuvo con los datos de las mediciones de los glaciares de 1998, y está dada en metros.

$x$ ,  $y$ ,  $z$ : Son las coordenadas calculadas en metros; si la distancia horizontal ( $d_{Hor}$ ) es menor a 1000 se toma a este dato como referencia o constante y si es mayor a 1000 se toma como dato de referencia a 10,000 y se suma el producto de la distancia horizontal y el seno del ángulo horizontal ( $H$ ) en radianes, análogamente

para  $y$  ;  $z$  se obtiene de la suma de un *punto de referencia* ( $P_{Ref}$ ) y la *altura del punto visado* ( $PV_{Alt}$ ) menos una constante, como se muestra en las siguientes formulas:

$$x = 1000 + (d_{Hor} * \text{sen}(H))$$

$$y = 1000 + (d_{Hor} * \text{cos}(H))$$

$$z = P_{Ref} + (PV_{Alt} - 1500)$$

$x_{corr}$ ,  $y_{corr}$ ,  $z_{corr}$ : son las coordenadas corregidas de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  tomadas de los datos obtenidos de la primera serie menos  $x$ ,  $y$ ,  $z$  de la segunda serie entre dos:

$$x_{corr} = x_1 + (c - x_2)/2 \text{ o } (x_1 - x_2)/2$$

$$y_{corr} = y_1 + (c - y_2)/2 \text{ o } (y_1 - y_2)/2$$

$$z_{corr} = z_1 + (c - z_2)/2 \text{ o } (z_1 - z_2)/2$$

donde:

$x_1$ ,  $y_1$ ,  $z_1$  = son las coordenadas de los datos de la primera serie

$x_2$ ,  $y_2$ ,  $z_2$  = son las coordenadas de los datos de la segunda serie

$c$  = es un constante (1000, 1000, 1500) de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  respectivamente, que se resta únicamente al primer valor de la segunda serie para obtener un factor de corrección.

$X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (*UTM*): son datos tomados de las mediciones del 1998 calculadas a partir de un *punto de referencia* ( $P_{Ref}$ : 537,894.001; 2,119,373.357; 5101.422) que se obtuvo de la medición con GPS de los puntos de la estación y los cuales se pueden propagar a coordenadas de los puntos medidos desde cada estación, por lo que se tiene:

$$X = P_{ref} + (x_{corr} - 1000)$$

$$Y = P_{ref} + (y_{corr} - 1000)$$

$$Z = P_{ref} + (PV_{Alt} - 1500)$$

*Tiempo (t)*: se obtiene a partir de la resta de las fechas en las cuales se realizaron las mediciones para cada intervalo (en este caso  $t_1$  para mayo 4 y  $t_2$  para noviembre 29), que corresponde a 209 días:

$$t = t_2 - t_1$$

*Diferencias en  $X_{Dif}$ ,  $Y_{Dif}$ ,  $Z_{Dif}$* : se toman a partir de los datos de las mediciones del 1998, las cuales resultan de la resta de las coordenadas en UTM de las dos diferentes fechas de medición ( $X_1, Y_1, Z_1$ ) para mayo y ( $X_2, Y_2, Z_2$ ) para noviembre, para cada punto dadas en metros:

$$X_{Dif} = X_1 - X_2$$

$$Y_{Dif} = Y_1 - Y_2$$

$$Z_{Dif} = Z_1 - Z_2$$

*Componente de movimiento absoluto (CMA)*: se obtiene por medio del cálculo del módulo de las coordenadas UTM; que es la suma de las coordenadas (UTM) al cuadrado cada una por la raíz cuadrada de dicha suma, para cada punto dada en metros:

$$|X, Y, Z| = \sqrt{(X)^2 + (Y)^2 + (Z)^2}$$

$$CMA = |X, Y, Z|_1 - |X, Y, Z|_2$$

*Tasa de movimiento (TM)*: se obtiene de la diferencia de los datos obtenidos en las componentes de movimiento absoluto con respecto al tiempo para las diferentes fechas (mayo y noviembre), dada en metros o milímetros por día:

$$TM = CMA / t$$

*Error a priori o estimación de precisión a priori*: se obtiene de multiplicar la distancia horizontal por el factor de corrección para cada fecha de acuerdo con las especificaciones de los instrumentos y posteriormente se obtiene el promedio

entre dichas fechas, que es finalmente el error de precisión para esa medición, dada en milímetros o metros:

$$Ep = (5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm} * d) \text{ o } (5 \text{ mm} + 0.000005 * d)$$

Con las variables obtenidas a partir del procesamiento de todos los datos obtenidos en campo y las calculadas en el gabinete, se tienen resultados (ver Apéndice I, II) que permiten realizar una discusión y llegar a conclusiones.

## IV. MONITOREO GLACIAL EN EL VOLCAN IZTACCIHUATL.

### IV.1. Los glaciares del Iztaccíhuatl.

El Iztaccíhuatl es parte de una sierra alargada de norte a sur con glaciares en ambos lados. La toponimia popular ha designado nombres a las formas más importantes según la fisonomía del volcán. Así, se tienen la Cabeza, el Cuello, el Pecho, la Panza, las Caderas que también se le conoce como las Costillas pero en este trabajo se utilizara el primero porque Lorenzo así lo menciona en su trabajo, las Rodillas, los Pies y los Tobillos; que a su vez forman tres grandes Sistemàs (Lorenzo, 1964), el del Pecho, la Panza y el de las Rodillas, que es donde se agrupan los glaciares y es donde debió tener un manto continuo de hielo durante las épocas de las grandes glaciaciones locales. Lo que ahora observamos son los restos de la última (Figura 17 y 18).



Figura 17. Vista aérea del volcán Iztaccíhuatl en donde se observan las formas más importantes según la fisonomía del volcán.

La siguiente descripción de los glaciares del Iztaccíhuatl está basada en el trabajo que publicó Lorenzo en 1964:

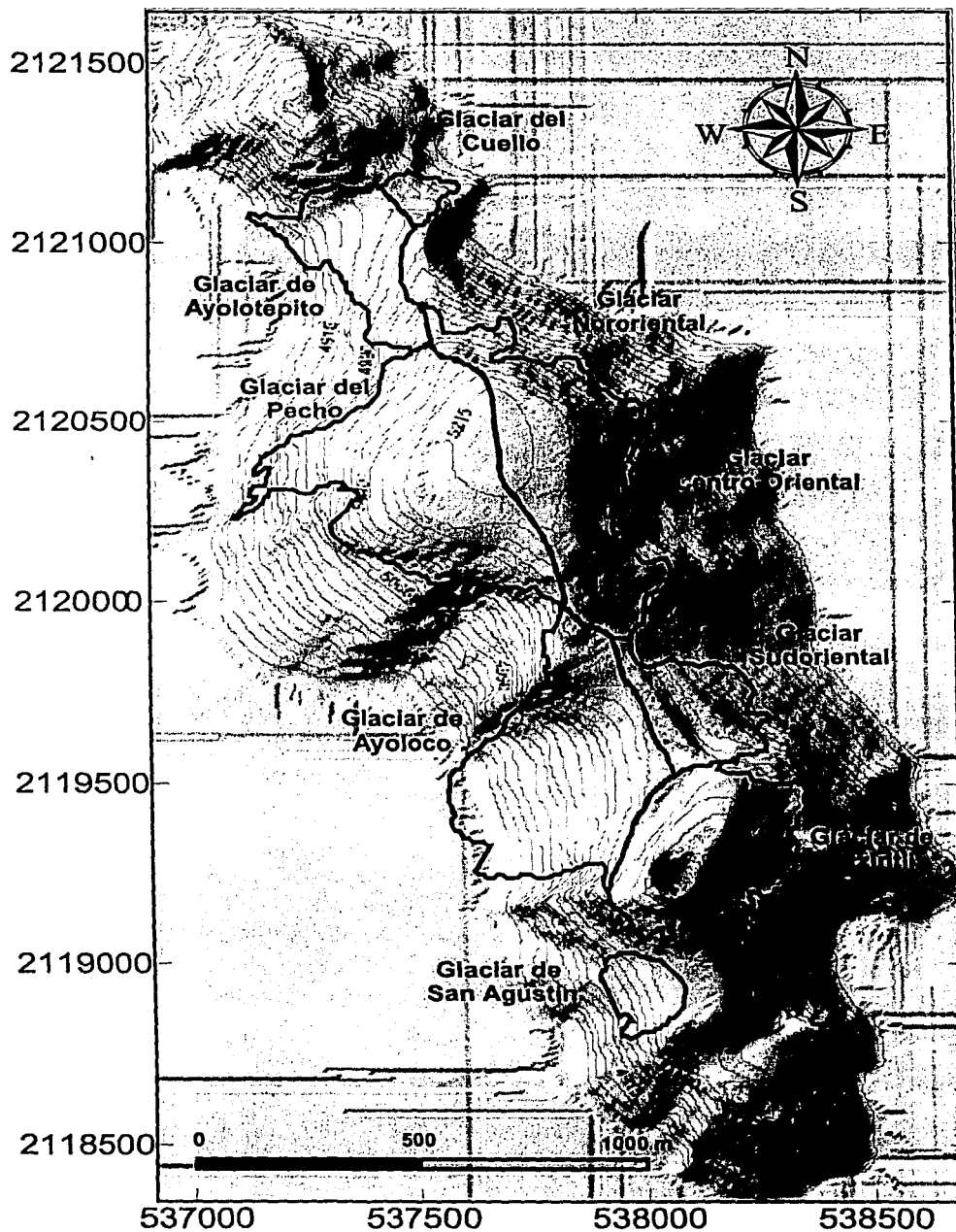


Figura 18. Modelo digital de elevación del volcán Iztaccíhuatl en donde se observa la delimitación de los glaciares propuesta por Lorenzo en 1964.

### *Sistema del Pecho.*

El primer *glaciar*, *el del Cuello*, forma parte del Sistema del Pecho. Es un glaciar pequeño situado al NE del Cuello sobre la ladera oriental (Figura 19), de ahí su nombre. Parece ser el resto de un glaciar más grande que se extendía por ese lado. Comienza a los 4,990 – 5,040 msnm y desciende hasta los 4,945 msnm, es bastante escarpado y tal vez de origen secundario. Forma o formó parte de la masa de hielo que desciende del Pecho hasta este lugar, el cual es un relicto que persiste debido a la alta cota en la que se localiza y su área estimada es de aproximadamente 20,000 m<sup>2</sup>.

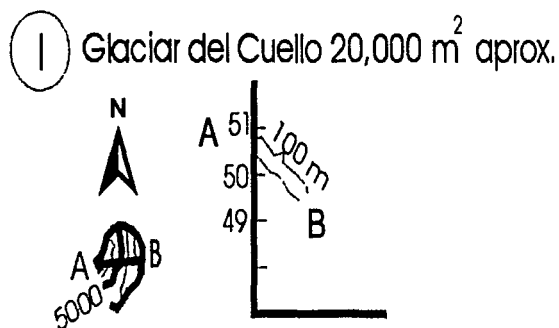


Figura 19. Parte del glaciar del Cuello visto desde la Cabeza N-S (izquierda). Perfil y área aproximada del glaciar (derecha) según Lorenzo (1964).<sup>1</sup>

En contacto con el glaciar anterior, en la parte del cuello pero extendiéndose por la ladera occidental, se encuentra el *glaciar de Ayolotepito* (Figura 20), el cual tal vez se trate de dos glaciares. El glaciar de Ayolotepito; baja desde el pecho en dos ramales. Uno por el cuello y otro bruscamente en cascada de hielo, terminando ambos en la hondonada de Chalchoapan, formando una pequeña laguna. El principal comienza a los 5,100 msnm para llegar a los 4,670 msnm. Hacia el sur de esta parte y en la zona del Pecho, la mayor altitud del

<sup>1</sup> Las fotografías son actuales y no corresponden con los datos de Lorenzo de 1964 exactamente, debido a la diferencia de fechas y sólo se usan como una referencia.

Iztaccíhuatl, existe otra masa de hielo al parecer unida en un sector mínimo a la masa principal, la cual se derrama al N la mayor parte con rumbo WNW y NW. La parte WNW se adelgaza en su extremo cerca de la cota 4,970 msnm, desprendiendo en algunas ocasiones bloques de hielo a las laderas inferiores. La parte NW se precipita sobre el lado sur, de la parte media del glaciar principal, apartándolo grandes bloques de hielo. En la figura 20 el corte A', B' correspondería al glaciar principal y el A, B al glaciar colgante WNW pero no se ha precisado su determinación, en conjunto constan de un área aproximada de 300,000 m<sup>2</sup>.

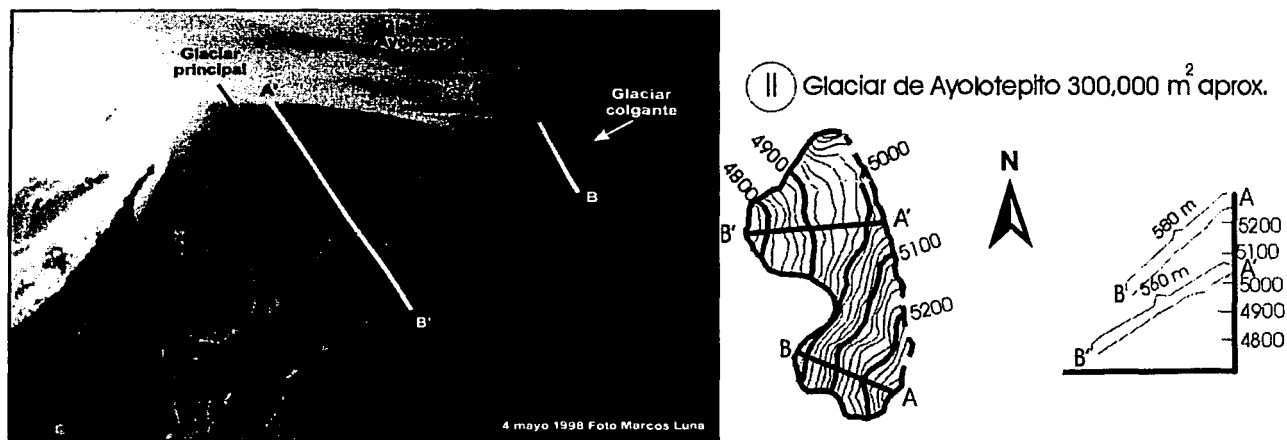


Figura 20. Glaciar de Ayolotepito visto desde la Cabeza N-NW donde se muestra el corte del glaciar principal A', B' y el glaciar colgante A, B (izquierda). Perfil, área aproximada y cortes (derecha) según Lorenzo (1964).<sup>1</sup>

En el Pecho se localiza otro *glaciar: el Nororiental* (Figura 21), que sale del pecho y se desploma en grandes torres de hielo, inicia en la cima que no se encuentra muy bien definida, porque la masa de hielo está cubierta de nieve y se precipita al ENE hasta los 4,980 msnm. En la parte N se puede regenerar un pequeño glaciar que cae al pie de los grandes farallones pero no ha sido comprobado. El área aproximada que ocupa es de 110,000 m<sup>2</sup>.



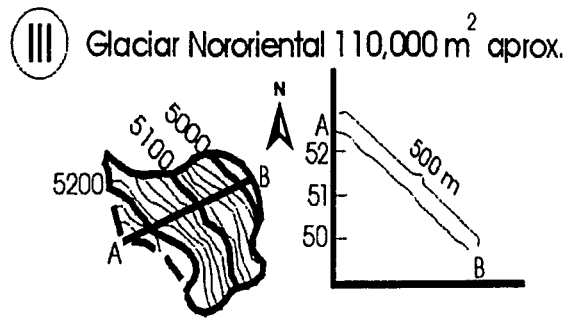
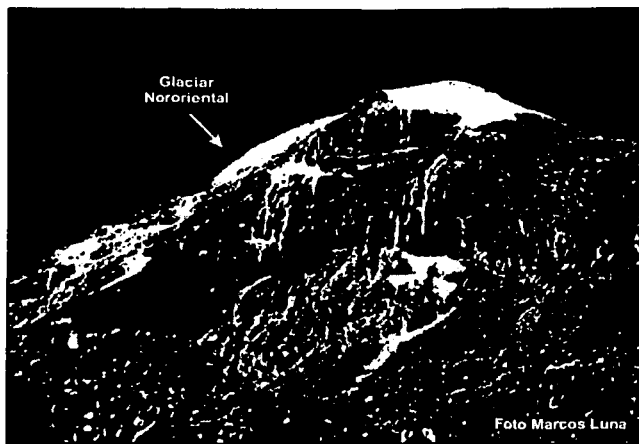


Figura 21. Perfil del glaciar Nororiental visto desde el collado del Teyotl N – NE (izquierda), Corte y área aproximada (derecha) según Lorenzo (1964).<sup>1</sup>

El *glaciar del Pecho* que ocupa la mayor parte de éste, se extiende al S (Figura 22), se encuentra unido al anterior y a la parte superior del glaciar de Ayolotepito. Llega desde la cumbre a la cota 5,180 msnm y parece ser resto de un glaciar más grande que se unía en la parte inferior con el glaciar de Ayoloco descrito mas adelante. El área que ocupa en forma planimétrica es aproximadamente 75,000 m<sup>2</sup>.

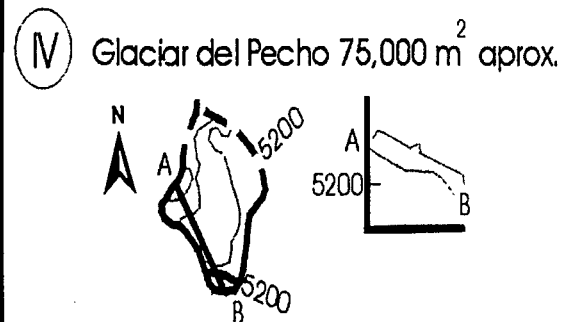
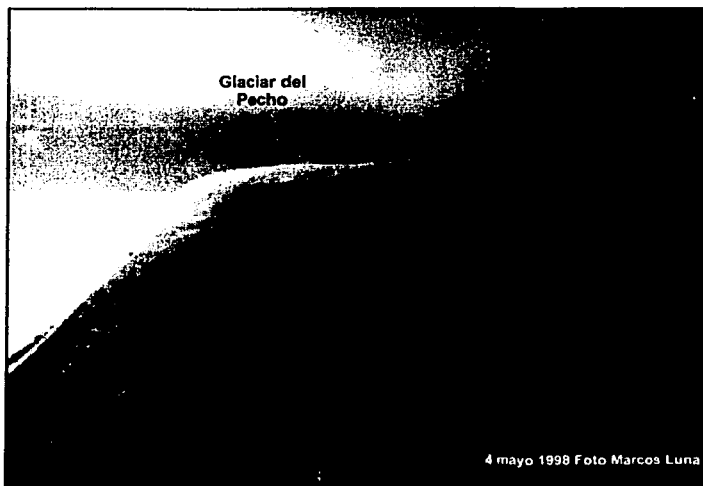


Figura 22. Se observa la parte más alta que corresponde al glaciar del Pecho en el perfil visto desde el lado W con helicóptero y en la parte frontal al centro el glaciar de Ayolotepito (izquierda), en la figura del lado derecho el perfil y área aproximada estimada por Lorenzo (1964).<sup>1</sup>

### Sistema de la Panza.

Este sistema lo conforman el *glaciar Centro – Oriental* (que baja por el lado E y se encuentra en la parte central de la Panza) y el de Ayoloco (Figura 23), marcando la separación de ambos, un espolón de roca. Se inicia a los 5,185 msnm y desciende a los 4,855 msnm, cubriendo un área aproximada de 140,000 m<sup>2</sup>.

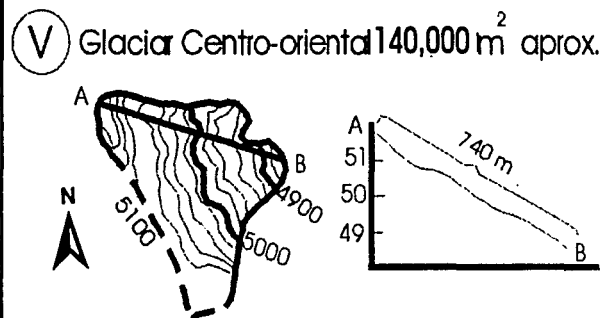


Figura 23. Se observa el espolón de roca que separa al glaciar Centro – Oriental y el de Ayoloco (izquierda). En la parte derecha de la figura el perfil y área aproximada estimada por Lorenzo (1964).<sup>1</sup>

El *glaciar de Ayoloco* en dirección W de la Panza (Figura 24), es tal vez el más citado de todos. El glaciar de Ayoloco nace en la Panza y desciende estrechándose, cada vez más, hasta terminar cerca del refugio del mismo nombre. La parte superior se encuentra a los 5,100 – 5,150 msnm y la parte en donde termina a los 4,668 msnm. En este se encuentran abundantes grietas y es una de las rutas clásicas de ascensión para los montañistas. El área aproximada que ocupa es de 285,000 m<sup>2</sup>.

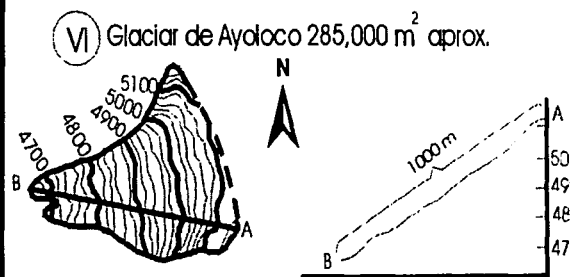
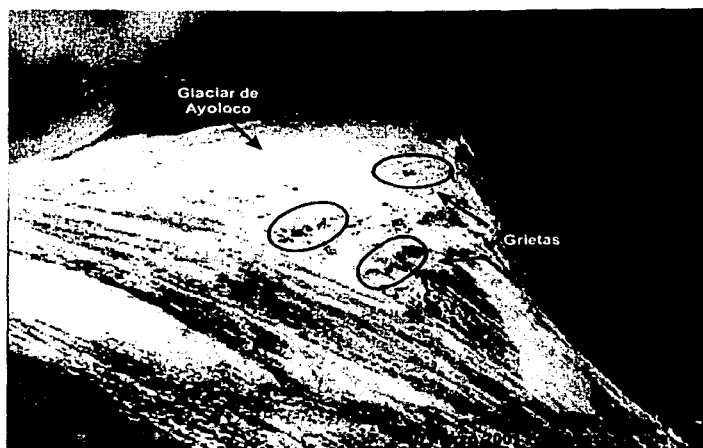


Figura 24. Glaciar de Ayoloco en el que se observa que desciende al W formando las grietas características por el movimiento (izquierda). Perfil y área aproximada estimada por Lorenzo (1964) se muestra en la parte derecha de la figura.<sup>1</sup>

El *glaciar Sudoriental* no es muy grande pero es escarpado, principalmente en su parte inferior (Figura 25). La parte superior se encuentra en la cota 5,130 msnm y termina en la cota 4,885 msnm, ocupa un área aproximada de 80,000 m<sup>2</sup>.

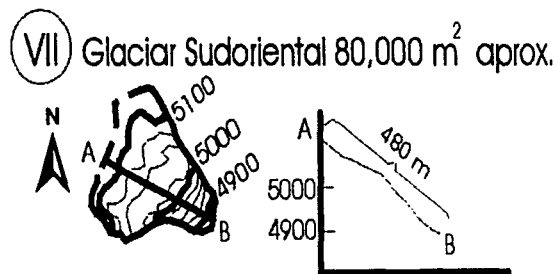
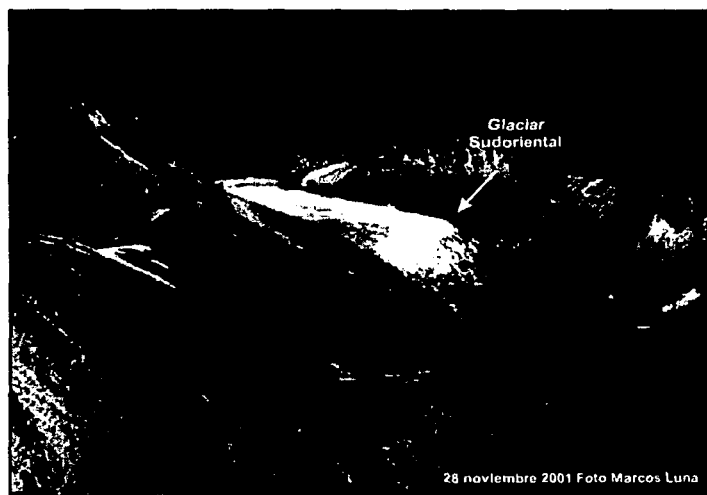


Figura 25. Glaciar Sudoriental visto desde las rodillas S-N, en donde se observa la parte escarpada de su parte inferior (izquierda). Área aproximada y perfil (derecha) estimados por Lorenzo (1964).<sup>1</sup>

### Sistema de las Rodillas.

Este sistema lo conforman únicamente dos glaciares, el primero es el *glaciar de Atzintli* que se extiende por el flanco W de la montaña, al S del glaciar de Ayoloco (Figura 26). Inicia en la cresta que une las Rodillas con la Cadera, en la cota 5,010 msnm y desciende hasta la cota 4,785 msnm. De un área regular que ocupa aproximadamente 120,000 m<sup>2</sup>. El glaciar Atzintli se encuentra al sur de la Peña Aguilera la cual ocupa el lugar de la cadera.

El segundo *glaciar* es el *de San Agustín* que es mas pequeño, llamado así por su cercanía con la Torre del mismo nombre (Figura 27), éste es apenas diferenciado de los campos de nieve que lo rodean, es el último resto de un glaciar mayor, se podría clasificar como un glaciar de circo por sus características actuales. Comienza en la cota 5,065 msnm y desciende hasta la cota 4,975 msnm. El área que ocupa y por lo que se sabe sólo consta de congesta es aproximadamente 30,000 m<sup>2</sup>.

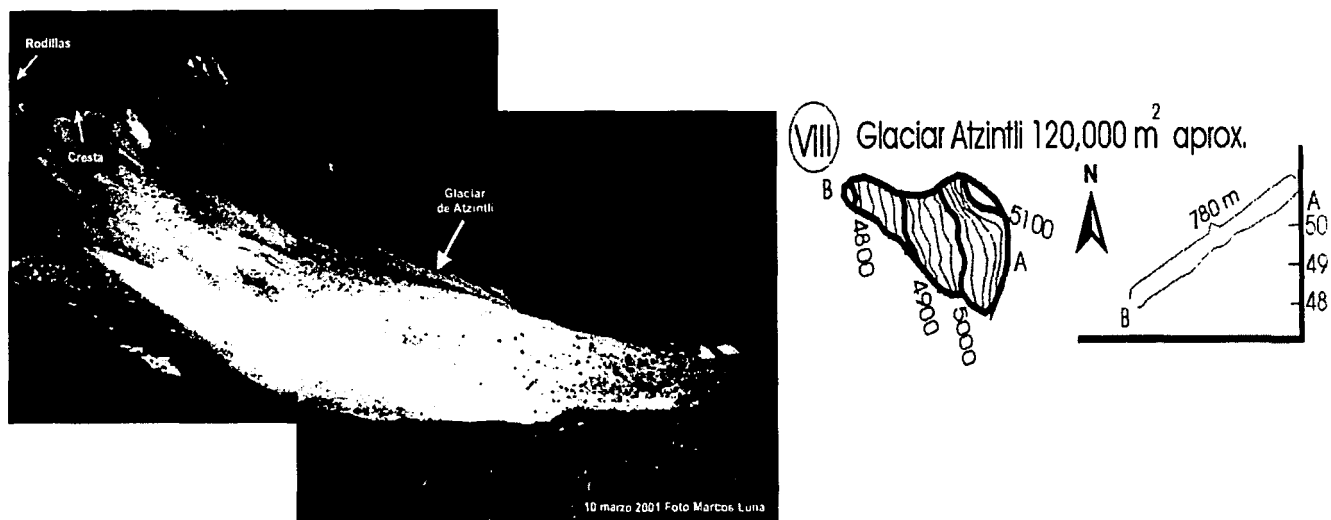


Figura 26. Glaciar de Atzintli visto desde las Caderas en donde se observa la cresta que une éstas con las Rodillas N-S (izquierda). El área y perfil estimados por Lorenzo (1964) se aprecian en la figura de la derecha.<sup>1</sup>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA



(IX) Glaciar Sn. Agustín 30,000 m<sup>2</sup> aprox

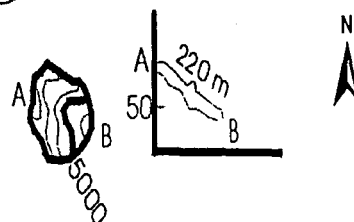


Figura 27. Se observa el lugar con características de circo que ocupaba el glaciar de San Agustín y restos de congesta que lo formaban (izquierda). Área aproximada y perfil (derecha) estimados por Lorenzo (1964).<sup>1</sup>

La gran diversidad de los glaciares del volcán Iztaccíhuatl, indica posiblemente la importancia del casquete de hielo que debió cubrir por completo la montaña durante otra época con condiciones propicias para los fenómenos glaciares. En la actualidad, algunos de los glaciares previamente descritos, prácticamente ya no existen (G.San Agustín y el del Cuello) y otros están por desaparecer (G.Atzintli y Centro-Oriental), de ahí la importancia del estudio y reconocimiento de los más grandes (sistema del Pecho y la Panza). Por esta razón enfocamos estos estudios a los glaciares Ayoloco y Sudoriental.

De acuerdo con las definiciones dadas , los glaciares del volcán Iztaccíhuatl podrían ser clasificados por sus dimensiones, condiciones topográficas y ubicación, como se muestra en la Tabla 1 (de acuerdo con lo descrito en la sección II.5.):

| <b>Clasificación de los Glaciares del volcán Iztaccíhuatl.</b> |                        |                      |                        |                        |
|--|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Glaciar</b>   | <b>Morfológica</b>     |                      | <b>Térmica</b>         | <b>Dinámica</b>        |
| <b><i>Sistema del Pecho</i></b>                                | <i>Ahlmann, (1948)</i> | <i>Field, (1964)</i> | <i>Ahlmann, (1948)</i> | <i>Ahlmann, (1948)</i> |
| Cuello   | B6 – B7                | 2                    | Templado - Tropical    | Extinto                |
| Ayolotepito  | B6 – B7                | 2                    | Templado - Tropical    | Extinto                |
| Nororiental  | B7                     | 2                    | Templado - Tropical    | Extinto                |
| Pecho  | A2                     | 1 - 5                | Templado - Tropical    | Pasivo                 |
| <b><i>Sistema de la Panza</i></b>                              |                        |                      |                        |                        |
| Centro-Oriental  | B6                     | 5                    | Templado - Tropical    | Activo                 |
| Ayoloco  | B6                     | 5                    | Templado - Tropical    | Activo                 |
| Sudoriental  | B6                     | 2                    | Templado - Tropical    | Activo                 |
| <b><i>Sistema de la Rodillas</i></b>                           |                        |                      |                        |                        |
| Atzintli   | B6                     | 2                    | Templado - Tropical    | Activo                 |
| San Agustín  | B6                     | 5                    | Templado - Tropical    | Extinto                |

Tabla 1: Clasificación de los glaciares del volcán Iztaccíhuatl (Hugo Delgado com. per.), (ver capítulo II).

A2: Glaciar de casquete o casquete de hielo, cubriendo un área menor que un glaciar continental.

B6: Glaciar de circo, localizado en un nicho aislado o en una ladera de la montaña.

B7: Glaciar de pared, cubriendo el lado de un valle o alguna parte de él.

1: Glaciares de cima.

2: Glaciares colgantes.

3: Hielo festoneado o laderas cubiertas de congesa.

4: Glaciares de acantilado.

5: Glaciares de cráter.

#### **IV.2. Logística.**

Para poder realizar los estudios, mediciones y toma de datos concernientes a los glaciares, primero es necesario planear cuáles son las mejores fechas para desarrollar el trabajo de campo, hacer un inventario de los recursos con los que se cuenta para poder realizar los mismos, llevar a cabo una organización de las personas que se va a disponer en el trabajo, del equipo de medición, víveres y vehículos disponibles.

Debido a las características del terreno, condiciones de alta montaña en donde se realiza el trabajo, se requiere el uso de unos vehículos y equipo con ciertas características especiales para desempeñar dichas labores de una manera lo más segura, sencilla, administrada y satisfactoriamente posible. Haciendo uso y

aprovechando al máximo los recursos con los que se cuenta, ya que éstos no están siempre disponibles o por lo menos en cantidad suficiente, de ahí la importancia de su buena administración.

Idealmente las campañas de mediciones se deben realizar por lo menos dos veces al año, y las mejores fechas son en los meses de abril-mayo que es cuando la acumulación de la nieve no es muy grande y noviembre-diciembre que es el tiempo de recarga y las condiciones del glaciar son buenas para poder realizar las mediciones. Una vez seleccionadas las fechas, se debe elaborar un plan de trabajo con el propósito de realizar de una mejor manera y con prioridad lo que se va a realizar, para con ello planear y distribuir el trabajo en el tiempo estimado. Teniendo un plan de trabajo previo, se procede a verificar la disposición y revisión de los vehículos que se van a utilizar para garantizar su funcionamiento óptimo y con ello evitar contratiempos de alguna descompostura mecánica.

Posteriormente se confirma a las personas que van a ser requeridas tanto para realizar las mediciones como aquéllas que van a servir de apoyo, y poder hacer una estimación de los víveres y equipo o material de montaña que van a ser requeridos para la campaña en función de los días y las persona con las que se cuenta y poder realizar las compras pertinentes.

Realizando una lista de los víveres adquiridos así como de las personas disponibles para la campaña y equipo requerido, se organiza su transportación y acomodo en los vehículos. El equipo que se va a utilizar en la campaña para las mediciones directamente en el glaciar, se revisa y se verifica que se encuentre en excelente estado de uso, en el caso de las baterías del equipo, que estén cargadas y debidamente protegidas para evitar se descarguen y/o maltraten. En general, el equipo que se encuentre debidamente en sus estuches bien cerrados y empacados.

Llegada la fecha de partida, previa organización, se realiza el traslado al lugar escogiendo la mejor ruta de acceso según lo descrito en el *capítulo I* en la sección de localización. Arribando al lugar, la distribución del equipo con el que cada uno debe llevar se organiza y distribuye para su traslado ya sea por la montaña o con la ayuda de un helicóptero (en caso de contar con él) hasta el glaciar en donde se va a montar el campamento base aproximadamente a unos 5,100 - 5,150 msnm, y en donde se instalan las tiendas dejando el equipo que no sea necesario en ese momento (como víveres para otras fases de la campaña). En este campamento se designan las diferentes brigadas para realizar el trabajo en el glaciar, se organiza a la gente que se va a encargar del campamento, de la comida y de otras actividades.

Acerca de las mediciones, se procura obtener el mayor número de datos posible, anotando cualquier detalle por mínimo que sea, de una manera confiable para evitar tener el menor error posible y la mayor toma de datos, para con ello, evitar perder tiempo que se traduce en pérdida de recursos, esfuerzo, desgaste de equipo y obviamente, tener que regresar en alguna otra fecha fuera de calendario o terminar el trabajo empezado en una segunda campaña, cuando que una nueva campaña debe de servir para obtener más datos. De la primer manera se atrasa el trabajo de campo y el de gabinete (procesamiento de los datos obtenidos) ya que siempre es difícil organizar una campaña tratando de optimizar los recursos con los que se cuenta.

Las personas que no están acostumbradas a estas altitudes por encima de los 5000 m, procuran alcanzar la cima y regresar, lo que constituye un esfuerzo, pues hay que tener en cuenta que para llegar a las nieves persistentes, se necesita llegar a los 4,500 msnm, lugar donde la mayoría se siente mal o se fatiga. Por lo tanto el realizar el trabajo a altitudes mayores en estas condiciones de poco oxígeno, baja temperatura, etc., es desgastante.



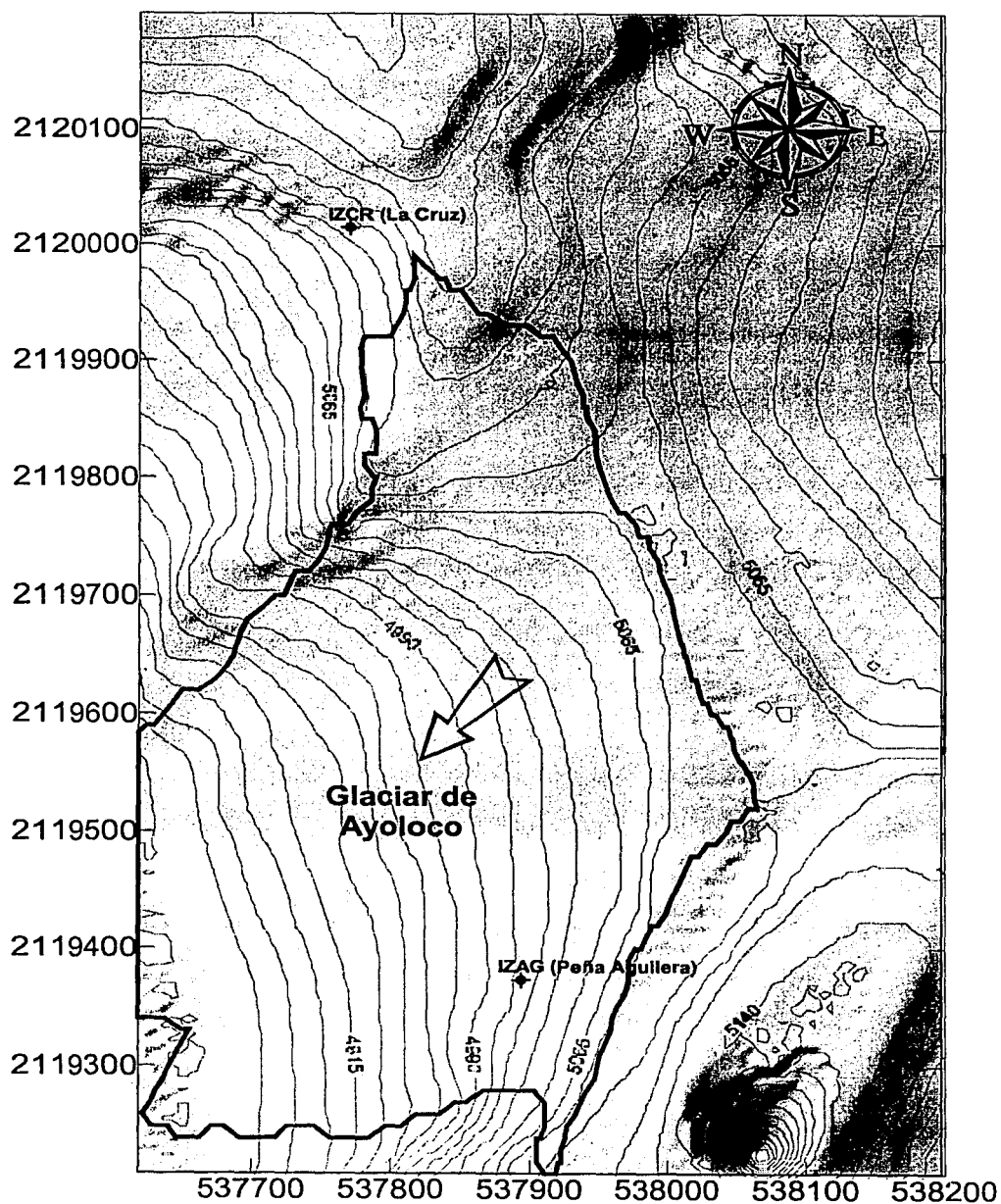
### ***IV.3. Trabajo de campo.***

El trabajo de campo sobre el glaciar, se realiza bajo la organización de fechas, gente, equipo, etc., mencionados. Organizado lo anterior y preparadas las brigadas, se buscan primero los puntos (Pins) fijados estratégicamente con anterioridad para colocar los receptores GPS (en este caso, uno de los puntos se encuentra cercano a la peña Aguilera (IZAG) y el otro punto en la Cruz (IZCR)) con el propósito de tener una referencia fija (Figura 28 y 29). También se localizan los puntos o estacas en el glaciar y se anotan las condiciones en las que éstas se encuentran (dobladas, tiradas o perdidas), otro GPS se puede desplazar directamente a los puntos en donde se encuentran las estacas en el glaciar y se toma referencia de cada uno de estos puntos con el propósito de llevar un control en caso de una posible sustitución o remplazo de alguna de las estacas por estar muy dañada o no encontrarse.



**Figura 28.** Localización de los puntos en donde se encuentran las estaciones IZAG e IZCR.

A partir de los puntos mencionados se coloca el equipo (teodolito y distanciómetro) para radiar y tomar las distancias de los puntos o estacas que se encuentran directamente en el glaciar (IZ00, IZ10, IZ20, IZ30, IZ31), se localiza y verifica la existencia de los prismas en las estacas (Figura 30), de otra manera se coloca una baliza con el prisma para poder visarlas y tener una reflexión del rayo infrarrojo del distanciómetro y obtener las distancias a partir de las estaciones iniciales de cada uno de los puntos.



**Figura 29.** Modelo digital en donde se observa el limite del glaciar de Ayoloco y la localización de las estaciones IZAG (Peña Agullera) e IZCR (La Cruz), la flecha indica la dirección del desplazamiento del glaciar.

*El procedimiento para la toma de lecturas angulares consiste en lo siguiente:*

Se enciende el teodolito con el switch ON/OFF.

Se gira el instrumento y su anteojo hasta que se oigan dos "bips", con lo cual se consigue la inicialización del teodolito. Deben aparecer dos lecturas angulares en pantalla.

Se observa el prisma que debió ser instalado previamente en el punto de referencia, hasta que la retícula del anteojo coincida perfectamente con el centro de dicho prisma. El movimiento se hace aflojando los dos tornillos de movimiento general del equipo: el *tornillo Particular* para el movimiento horizontal, y el *tornillo Superior* para el movimiento vertical. Cuando la visual esté muy cerca de la marca, los dos tornillos se aprietan y se mueven sus respectivos tornillos tangenciales para movimiento fino, hasta que se consiga coincidencia perfecta con la retícula.

Se presiona la tecla "SET", con lo que el ángulo horizontal presentado en pantalla se transforma en 0.000, y el valor angular vertical permanece en una cifra cualesquiera. Estos valores deben anotarse en la bitácora, de la cual se muestra un ejemplo más adelante (Tabla 2).

Se liberan los tornillos de movimiento general y se gira todo el instrumento tanto en sentido horizontal como en sentido vertical, movimiento denominado "vuelta de campana", hasta que la segunda cara del instrumento quede frente al operador (esta posición se llama *Cara 2* o *Inversa*, mientras que la lectura del paso 3 se llama *Cara 1* o *Directa*). En esta posición, se vuelve a anotar la lectura de los ángulos horizontal y vertical (Tabla 2).

El par de lecturas obtenidas en C1/C2 se denomina una *Serie*, y deben repetirse tantas series como precisión se requiera obtener, considerando que el ángulo horizontal en C2 debe ser  $180^\circ$  o  $200^\circ$  mayor o menor que la lectura en C1, con una variación máxima de  $\pm 5''$ , y en vertical deben ser complementarios los valores angulares (es decir,  $\angle V_{C2} = 360 - \angle V_{C1}$ ), también con una variación de

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

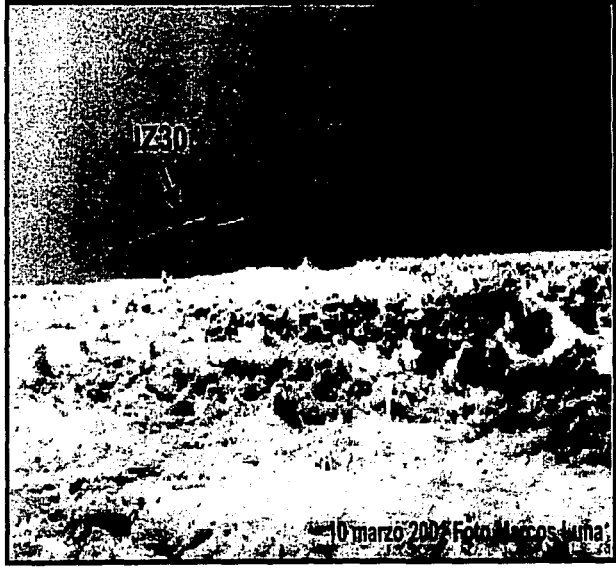
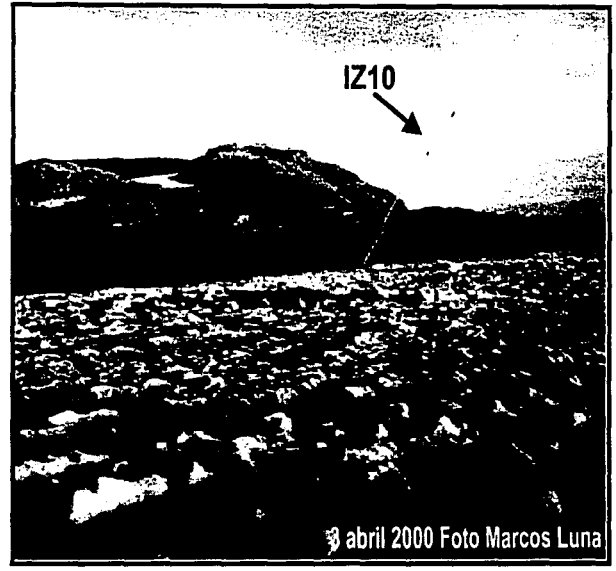
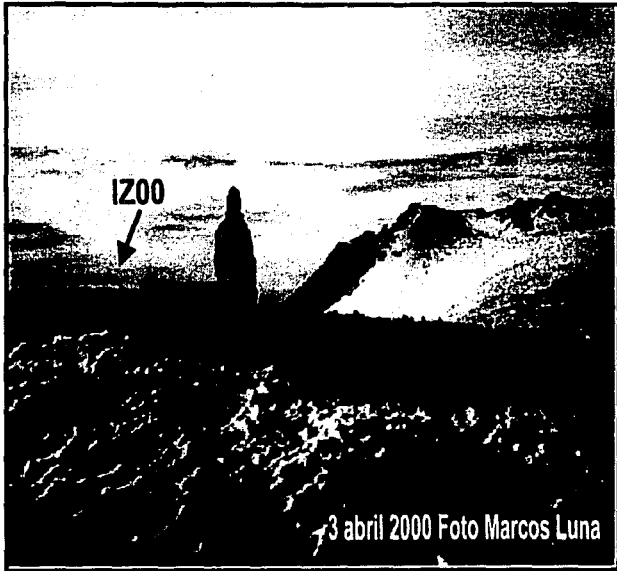


Figura 30. Localización de las estacas en el glaciar.

$\pm 5''$ , ó  $\pm 0.005^g$ , y en vertical deben ser iguales los valores angulares, también con una variación de  $\pm 0.005^g$  respectivamente.

Hecho lo anterior, se comienza a medir cada punto en estudio con el mismo procedimiento de la Serie, hasta cubrir todos los puntos. El conjunto de series hacia cada punto en estudio se denomina *Radiación*, mientras que la lectura inicial hacia el punto de referencia se denomina *Toma de Referencia*. Es necesario repetir por lo menos una serie de *Toma de Referencia* cada seis u ocho puntos, para vigilar que no se hayan movido los valores angulares iniciales. En caso de que así haya sido, se debe considerar a criterio si el valor se puede corregir poniendo en  $0^\circ 00' 00''$  ó 0.000, respectivamente, si se esta trabajando en gones. Nuevamente el valor inicial (si el error es pequeño), o si debe repetirse la medición.

Como una prevención para evitar lo anterior, deben vigilarse continuamente los niveles tubulares, pues son un buen indicio de si el equipo se ha movido ( no se debe tocar el tripié ni el equipo en ningún caso, salvo para aflojar o apretar los tornillos generales o girar para C1/C2). Además, es conveniente tomar una referencia externa hacia un punto cualquiera, a una distancia no mayor de 30 metros, para una toma de referencia más accesible en caso de niebla, reverberación, o cualquier suceso que impida la visibilidad de la referencia principal.

Antes de terminar la medición, se hace una toma de referencia final, se mide la altura del teodolito desde la marca en el piso hasta el centro del anteojo (el cual está marcado en el costado del teodolito) y se anota en la bitácora, junto con la altura del prisma que se debe haber tomado al instalar la referencia (Tabla 2).

El paso siguiente es cambiar de estación y referencia, y repetir todo el procedimiento.

*El procedimiento de medición de distancias es como sigue:*

Después de la toma de *Cara 1* hacia el primer punto medido, se enciende el distanciómetro poniendo el botón de encendido en la posición "*MEAS*" (de su abreviatura en inglés *Measure* (medida)). El equipo entra a un *autotest* y permanece en espera de la orden de medición. En pantalla aparece la leyenda "M 0 000", que indica que se va a medir en metros y con 0 ppm de corrección, las cuales se aplicarán después, puesto que se deben tomar en campo lecturas de temperatura y presión en conjunto con la medición angular.

Se apunta con el ocular del distanciómetro hacia el punto en medición, lo cual debe hacerse girando el instrumento sólo en sentido vertical (pues se considera que ya se ajustó la posición horizontal descrita líneas arriba), esto se hace aflojando el tornillo *Vertical* del distanciómetro, luego se apunta hacia el prisma, y cuando la visual esté cerca, se aprieta el tornillo *Vertical* y se mueve su tornillo *Tangencial* para movimiento fino, hasta que quede perfectamente centrado el prisma con la retícula.

En este momento se presiona el botón blanco del distanciómetro, el cual emite un rayo infrarrojo para medir la distancia, la cual aparece en pantalla a los pocos segundos. Se debe presionar nuevamente el botón del distanciómetro para detener la medición, pues de lo contrario, el distanciómetro vuelve a medir la distancia en forma ininterrumpida, lo cual gasta la batería.

Se anota la distancia en el renglón correspondiente de la bitácora (Tabla 2), y se apaga el distanciómetro, para ahorrar batería. La medición de distancias se hace sólo en C1, pues en C2 el distanciómetro queda apuntado al revés y no se puede utilizar.

En caso de que el distanciómetro no localice al prisma, debe verificarse lo siguiente: el prisma debe estar bien centrado tanto en horizontal como en vertical; debe haber visibilidad entre la estación y el punto a medir; el prisma debe estar orientado hacia el equipo; la batería debe tener buena carga; las distancias largas

necesitan a veces más prismas colocados en la baliza; y en general, deben darse buenas condiciones para la medición, tanto físicas como atmosféricas.

*Bitácora de medición.*

Tabla 2. Ejemplo de bitácora de medición:

| ST      | PV     | < V        |         | < H        |         | D/      | Φ     | T  | P   | OBS |
|---------|--------|------------|---------|------------|---------|---------|-------|----|-----|-----|
|         |        | (grados)   | (gonos) | (grados)   | (gonos) |         |       |    |     |     |
| 1001    | 1000 D | 89°37'20"  | -19.372 | 0°00'00"   | 0       | 432.892 | 1.465 | 5° | 720 |     |
| Á 1.575 | 1000 I | 270°22'40" | -19.374 | 180°00'02" | 200.003 |         |       |    |     |     |
|         | 1 D    | 85°38'49"  | -15.899 | 218°14'54" | 375.456 | 320.754 | 3     | 5° | 720 |     |
|         | 1 I    | 274°21'14" | -15.895 | 38°14'58"  | 175.454 |         |       |    |     |     |
|         | 2 D    | 96°37'40"  | 6.374   | 135°25'29" | 171.211 | 570.383 | 2.5   | 5° | 720 |     |
|         | 2 I    | 263°22'16" | 6.374   | 315°25'34" | 371.214 |         |       |    |     |     |

Donde:

ST estación.

PV punto visado o medido (referencia, punto en estudio, etc.).

< V ángulo vertical en grados sexagesimales o en gones.

< H ángulo horizontal en grados sexagesimales o en gones.

D/ distancia inclinada o directa entre el distanciómetro y el prisma, en metros.

Φ altura del prisma sobre el punto medido, en metros.

T temperatura en grados centígrados.

P presión en milibares (hectopascales).

D, I lectura en Cara 1 (D), lectura en Cara 2 (I).

OBS observaciones.

Á altura de instrumento desde la estación hasta el centro del teodolito, en metros.

También es conveniente anotar el nombre del proyecto, fecha, participantes y el modelo de teodolito y distanciómetro empleados, la distancia entre el centro del teodolito y el centro del distanciómetro (194 mm en estos modelos

específicos), y en general, cualquier cosa de interés dentro de la medición. Además, es necesario dibujar un croquis con la posición relativa de las estaciones y de los puntos medidos.

Antes y después de salir a campo, es conveniente revisar el equipo para determinar fallas o errores en el funcionamiento del mismo. En general, el equipo debe estar limpio y con sus baterías cargadas, ser tratado con cuidado y no trasladarlo montado en el tripié.

#### ***IV.4. Instalación de estacas.***

En las primeras campañas que se realizaron para la colocación de estacas en el volcán Popocatépetl, originalmente se instalaron una serie de estacas de madera de 1.50 x 10 cm con una escala grabada cada 10 cm, que fueron colocadas directamente en el glaciar abriendo agujeros con el piolet, hasta enterrarlas una profundidad de por lo menos 1 metro para tener un parámetro de medición, la cual se realizó empleando una mira Invar y teodolito. Sin embargo no se obtuvieron buenos resultados.

Basados en esta experiencia, las estacas de madera se sustituyeron posteriormente por estacas de metal (tubos de aluminio) que se instalaron tanto en Popocatépetl como en el volcán Iztaccíhuatl, de una longitud aproximada de 9 metros y 2 pulgadas de diámetro, insertándolas por lo menos 6 metros, quedando 3 metros fuera y colocándoles un prisma en la parte superior para poder realizar las mediciones.

Estas primero se instalaron mecánicamente con una perforadora manual con barrena de cuerda helicoidal en el volcán Popocatépetl (Figura 13, Capítulo III). Posteriormente se desarrolló un sistema de perforación a vapor construido en el Instituto de Geofísica, que se empleó para instalar las estacas en ambos



volcanes y cuya metodología es descrita en el capítulo III.1, el cual consiste en un calentador de paso, una bomba hidráulica de funcionamiento manual que posteriormente se reemplazo por una bomba eléctrica, y con la cual se tuvo que implementar el uso de un generador eléctrico para su funcionamiento, un tanque de gas de 10 kg, un sistema de mangueras para la conexión del sistema, un contenedor plástico aproximadamente 30 litros, para suministrar el agua requerida para la perforación, un serie de filtros y garrafones de agua de 19 litros.

Por lo que se aprecia en la descripción del material empleado, esta tarea de perforar con está metodología es muy ardua, aún con la ayuda en gran parte del helicóptero, cuando éste se encuentra disponible, para el transporte del material y las personas al glaciar (Figura 31).



**Figura 31.** Transporte del material y personas con ayuda del helicóptero, en segundo plano se observan los vehículos terrestres utilizados.

Foto Lucio Cárdenas

Con el propósito de tener un parámetro de control sobre el desplazamiento de los glaciares en el volcán Iztaccíhuatl, se instalaron una serie de estacas principalmente en el glaciar de La Panza, utilizando para ello cierto criterio para ubicarlas (como la pendiente, ubicación de las grietas, lugares con buena visibilidad, etc.) y adoptándose aquellos procesos con los que se obtuvieron mejores resultados (como la perforadora de agua caliente) y descartando la utilización de algunos materiales (como estacas de madera), siguiendo metodologías similares (Figura 32).

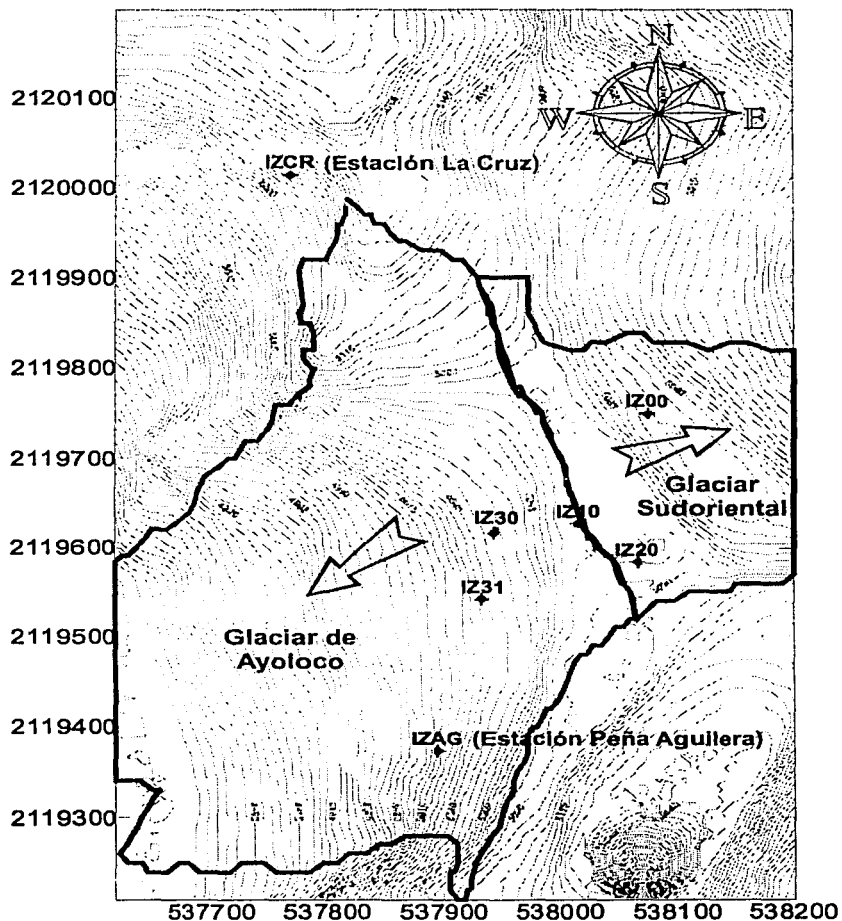


Figura 32. Ubicación de las estaciones y estacas en el Sistema de la Panza.

En la actualidad se emplea una perforadora desarrollada y diseñada especialmente para este trabajo, similar a la perforadora helicoidal utilizada inicialmente en el volcán Popocatépetl, pero con un sistema mecánico que emplea engranes en su funcionamiento, con extensiones huecas de aproximadamente 3 metros. Brocas helicoidales que se utilizan para perforar en el hielo y un sistema desmontable para su transporte que consta de un tripie telescópico para su emplazamiento en la superficie del glaciar, de un material ligero y resistente tanto a la abrasión como al trato (duraluminio). Esto reduce su peso, tamaño y facilita su transporte, cosas muy importantes en el trabajo de campo realizado en las campañas de medición.

#### ***IV.5. Monitoreo.***

En diferentes fechas se han realizado campañas de mediciones en los glaciares del Iztaccíhuatl ( N19° 02', W 98° 06') de 5,286 msnm, con el propósito de determinar velocidades en la superficie del hielo, vectores de desplazamiento y tasas de movimiento. Para ello se contó con equipo tradicional de topografía así como de dos receptores GPS. Se midieron distancias, rumbos y ángulos verticales (Apéndice I).

Se realizaron las mediciones con el siguiente equipo:

##### *Rumbos y ángulos verticales:*

- Teodolito electrónico digital:  
SOKKIA DT5
- Distanciómetro electrónico  
SOKKIA RED2LV
- GPS: Sistema Trimble DGPS

La precisión del equipo es como sigue:

SOKKIA RED2LV

Se obtiene de multiplicar la distancia horizontal por el factor de corrección  $(5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm} * d)$  o  $(5\text{mm} + 0.000005 * d)$ .

SOKKIA DT5

Ya que no se dispone de un contador de frecuencia, no se puede controlar la frecuencia de medición. Un error eventual se puede detectar con un ajuste de la red mediante la comparación de las distancias medidas con otro distanciómetro.

La constante de adición todavía no se ha determinado. Debido a que el distanciómetro es nuevo, se confió en el valor indicado por el fabricante (0 mm).

#### *Aparatos meteorológicos.*

Debido a que el barómetro sólo dispone de una escala hasta 730 hPa se leyó en el campo presiones barométricas. Con una comparación de presiones barométrica y presión en la Ciudad de México se pudieron transformar las presiones a alturas mediante la formula barométrica (Apéndice I, II).

#### *Reflectores*

Se confió en las indicaciones de los valores del fabricante. La constante aditiva de los reflectores de la marca "OMNI" es +30 mm. Para las estacas fijas no importa la constante aditiva, debido a que esta se elimina durante las comparaciones. Sin embargo, hay que emplear siempre la misma constante. En este caso se empleo una constante de 30 mm.

### *Desarrollo de las mediciones.*

Las mediciones tuvieron lugar en diferentes fechas y años. Sin embargo, sólo se tomaron las correspondientes a 1998, gracias al alcance grande del distanciómetro, las mediciones se pudieron hacer directamente sin tener que realizar puntos de liga en el glaciar como en algunas ocasiones para las mediciones como en otras campañas. El distanciómetro RED2LV permitió realizar mediciones desde algunos puntos fijos a otros puntos ubicados directamente en el glaciar (Apéndice I, II).

### *Direcciones.*

En algunas estaciones se midieron por lo regular tres series, alcanzando desviaciones estándar para un rumbo promedio alrededor de 3".

### *Ángulos verticales.*

Se midieron también tres series de ángulos verticales en horas diferentes para minimizar el efecto de la refracción. Se alcanzaron precisiones alrededor de 5" para un ángulo promedio.

### *Distancias.*

Cada distancia fue medida por lo menos tres veces de manera independiente (con nueva puntería). En las estaciones se registraron presiones y temperaturas para cada medición (Apéndice I, II), en algunos casos las estacas o puntos se encontraron muy inclinados o caídos sin poderse recibir una señal a partir de dichos puntos. En algunos puntos se tuvo que ascender a las estaciones para revisarlas. En las series de mediciones se anotó una desviación mayor del error del distanciómetro, esta desviación se redujo con los vientos fuertes que soplaron en algunas ocasiones alrededor del volcán.

### *Ajustes de las mediciones.*

El fin de los ajustes es la detección de errores gruesos y/o sistemáticos es una estimación de la precisión de los grupos de observaciones diferentes y de un mejoramiento de la confiabilidad y precisión de las coordenadas. Una vez libres de errores gruesos las mediciones libres se pueden utilizar para comparaciones (Apéndice V, VI, VII). Se tomaron en cuenta la constante aditiva del distanciómetro y de los prismas así como la corrección meteorológica.

### *Ajuste común para obtener velocidades, vectores de desplazamiento y tasas de movimiento.*

El fin de la red en los diferentes glaciares es determinar velocidades, direcciones y movimientos relativos del hielo. Las campañas realizadas hasta la fecha han permitido calcular vectores de velocidad en diferentes temporadas. Se empleo un ajuste común aplicado a todas las mediciones realizadas hasta la fecha. Algunos vértices se consideraron fijos, en el modelo matemático se supone que las estacas no se mueven dentro de la misma campaña; esto no corresponde con la realidad. Sin embargo, se obtiene un promedio controlado y preciso que es representativo para una sesión de medición. Por ello en algunos casos sólo se estimaron tres pares de coordenadas separadas por cada estaca. Entonces las diferencias entre las dos estimaciones entregan la velocidad de la estaca (Apéndice VII).

Se estimó un factor de escala para cada época para obtener un control sobre la frecuencia de medición de los aparatos así como la reducción meteorológica.

El monitoreo, como ya se había comentado, se debe realizar por lo menos dos veces al año, y las fechas mas adecuadas son en los meses de abril-mayo y noviembre-diciembre, cuando las condiciones del hielo y climáticas son buenas para poder realizarlas.

#### ***IV.6. Patrones de precipitación y temperatura en el área circunvecina.***

El estudio de las tendencias que existen en la temperatura y precipitación, así como los efectos que la variación de estos parámetros pudiera tener sobre el clima y los glaciares de la zona fue realizado por Ortega del Valle (2001), examinando los datos meteorológicos por estación en el área del volcán Iztaccíhuatl.

Para el Iztaccíhuatl se utilizaron los datos promediados de las estaciones Río Frio, Estado de México ubicada al norte del volcán (Coordenadas 19°21' N, 98°40' W; Altitud 3,000 msnm), San Rafael, Estado de México (Coordenadas 19°18' N, 98°48' W; Altitud 2,500 msnm) y Amecameca, Estado de México (Coordenadas 19°08' N, 98°46' W; Altitud 2,479 msnm), en el poniente, y Huejotzingo, Puebla (Coordenadas 19°09' N, 98°24' W; Altitud 2,291 msnm) al oriente.

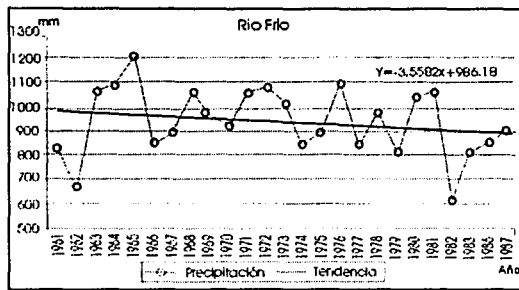
##### *Patrones de precipitación y temperatura por estación.*

Ortega del Valle (2001) en su trabajo, menciona la tendencia de los patrones de precipitación y temperatura que se tienen en las estaciones de las zonas cercanas al volcán y las más importantes son:

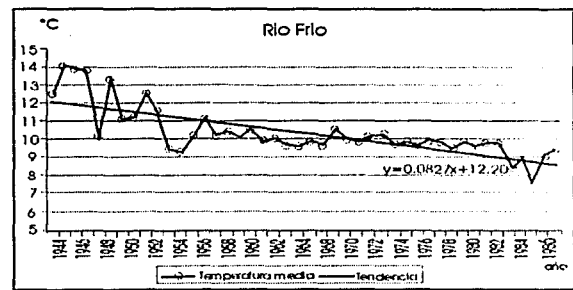
- Estación Río Frio, periodo 1944 – 1987.

*Precipitación.* El año más húmedo es 1965. La línea de tendencia muestra una disminución en los valores de precipitación en todo el periodo estudiado, con fuertes variaciones al final de la época de los 80 (Figura 33 a).

*Temperatura.* Los datos hasta 1953 alcanzan las temperaturas más altas de la serie, de 1956 a 1982 los datos tienen tendencia a permanecer entre los 9° y 11°, de 1983 en adelante hay temperaturas más bajas que éstas. La línea de tendencia indica una disminución de temperatura (Figura 33 b).



(a)



(b)

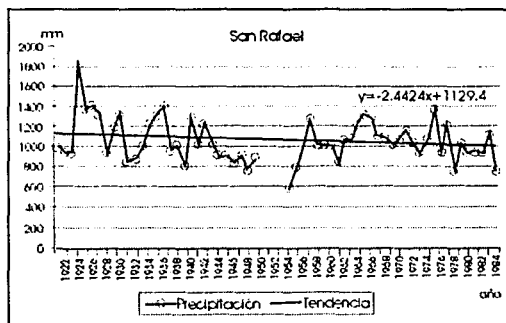
Figura 33. Gráfica de precipitación (a) y temperatura (b), estación Río Frio (Ortega del Valle, 2001).

- Estación San Rafael Tlalmanalco, periodo 1922 – 1985.

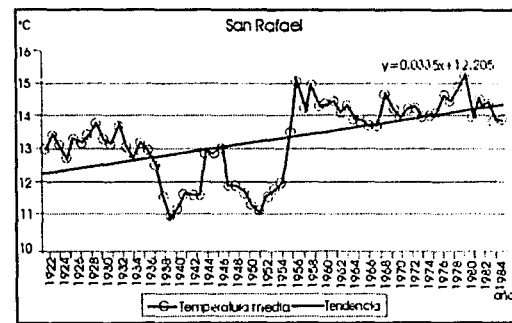
**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

*Precipitación.* A partir del año 1926 hasta 1951 se nota una brusca disminución de la precipitación, a partir de ese año los valores de la precipitación aumentan, para luego volver a disminuir, existe una tendencia general de los datos de precipitación a disminuir (Figura 34 a).

*Temperatura.* En años anteriores a 1933 los valores no tienen una variación significativa. De 1938 a 1943 y desde 1947 a 1953, los valores disminuyen. En 1953 comienza a aumentar la temperatura hasta 1956, a partir de este año y hasta 1984 los valores se mantienen constantes por arriba de los 14°. La tendencia de la temperatura es de aumentar (Figura 34 b).



(a)



(b)

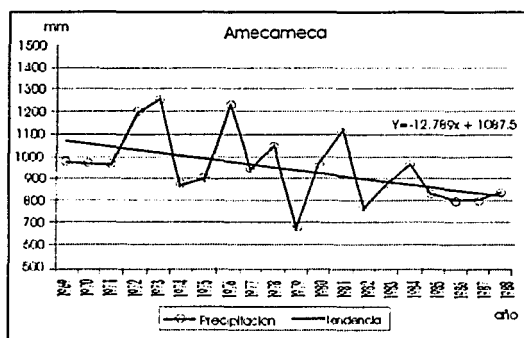
Figura 34. Gráfica de precipitación (a) y temperatura (b), estación San Rafael (Ortega del Valle, 2001).



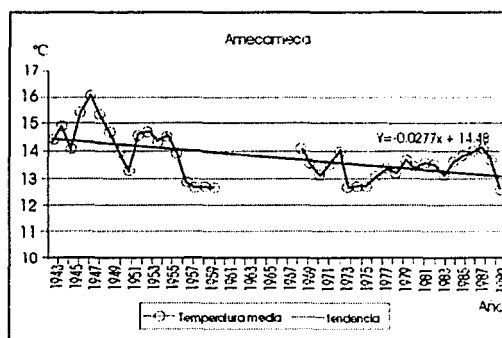
- Estación Amecameca, periodo 1943 – 1988.

**Precipitación.** Los valores más altos de precipitación se encuentran en los años 1972, 1973, 1976 y 1981; aunque en los años a partir de 1984 se nota un decremento mas marcado en la precipitación, en toda la grafica existe una tendencia hacia la disminución. El valor mas bajo es en el año 1979 (Figura 35 a).

**Temperatura.** En el periodo 1947 a 1960 la temperatura disminuye con una diferencia de cerca de 3.5°. De 1974 a 1988 aumenta casi 2°. La tendencia de la temperatura en todo el periodo es a disminuir (Figura 35 b).



(a)



(b)

Figura 35. Gráfica de precipitación (a) y temperatura (b), estación Amecameca (Ortega del Valle, 2001).

- Estación Huejotzingo, periodo 1942 – 1990.

**Precipitación.** 1942, 1953, 1982 fueron años muy secos. 1943, 1954 a 1956, 1958, 1963, 1965, 1981 son los años más húmedos de toda la serie. La precipitación tiene una tendencia al aumento (Figura 36 a).

*Temperatura.* Los valores de los 46 años estudiados muestran variaciones, pero en general hay una tendencia hacia el aumento de la temperatura. En 1945, 1948, 1958, 1964, 1970 a 1972, los valores están elevados con respecto a años anteriores o posteriores. En la década de los 80s se nota una propensión hacia el incremento de temperatura (Figura 36 b).

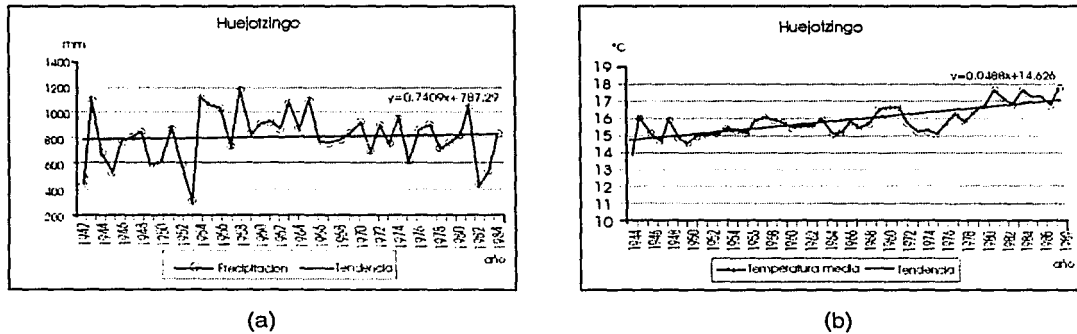


Figura 36. Grafica de precipitación (a) y temperatura (b), estación Huejotzingo (Ortega del Valle, 2001).

Los datos de temperatura media anual y precipitación anual, de las estaciones tomadas en cuenta para esta área, se promedian y son del periodo que va de 1922 a 1990.

La temperatura en general tiene una tendencia hacia el aumento que coincide con el aumento de la temperatura global señalado por Gutzler (2000). De 1938 a 1943 se presentan los datos de menor temperatura. La mayoría de los años que no están dentro de este mismo periodo se encuentran por arriba del promedio. El promedio de temperatura es de 13.3°. 1955, 1988, 1989 y 1990 son los años con mayor temperatura de la serie (Figura 37 a). La estación Rio Frio parece no haber sufrido un cambio apreciable en la temperatura en los últimos cincuenta años.

La precipitación tiene variaciones con respecto a la media que es de 937.09 mm. Los años desde 1922 hasta el de 1953 muestran un periodo de disminución de la lluvia, de ahí hasta 1965 se da un periodo de aumento y una disminución hasta 1985 aunque con muchas variaciones intermedias. En 1953 se da el valor más bajo de la serie y en 1926 el mas alto. La tendencia de la precipitación en general es a disminuir (Figura 37 b).

Los glaciares como masas de hielo en movimiento, responden a las condiciones de precipitación y temperatura para su crecimiento, retroceso y permanencia, lo cual significa que las tendencias climáticas se verán reflejadas notoriamente en los glaciares.

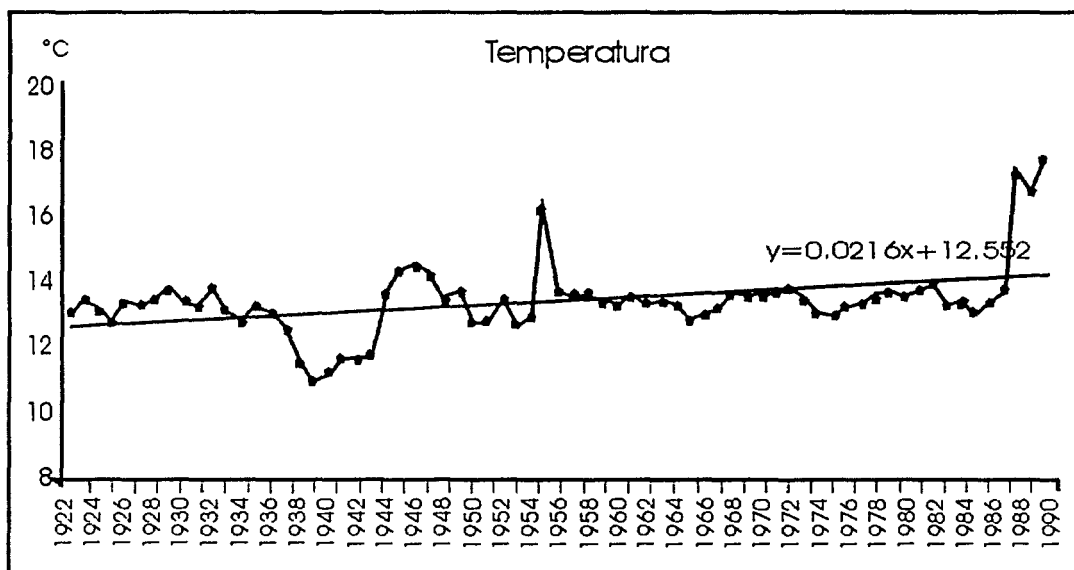


Figura 37 a. Gráfica de temperatura del área circundante al volcán Iztaccíhuatl (Ortega del Valle, 2001).

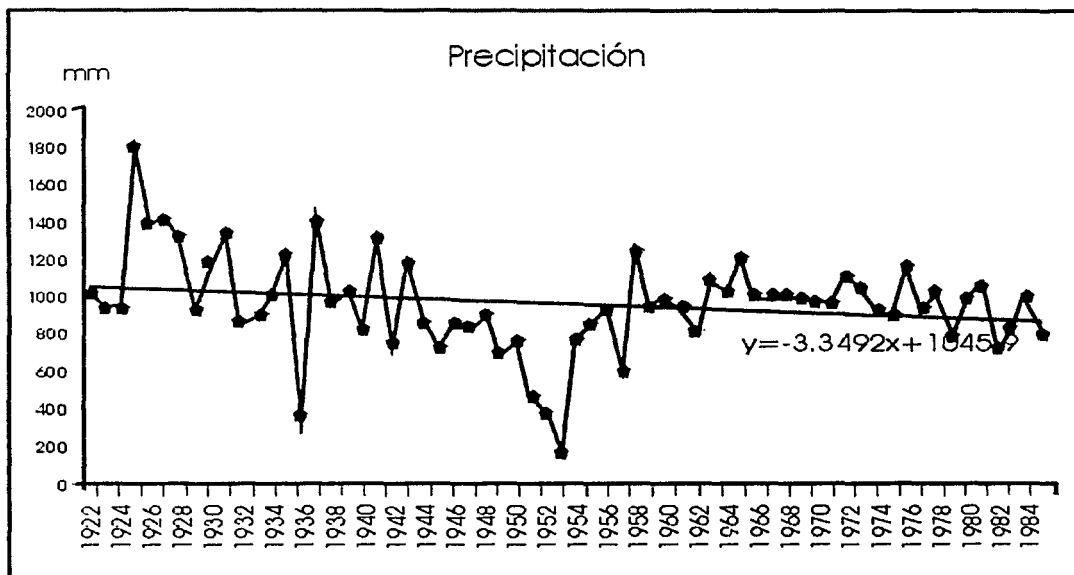


Figura 37 b. Gráfica de precipitación del área circundante al volcán Iztaccíhuatl (Ortega del Valle, 2001).

## V. RESULTADOS.

Con el procesamiento de los datos obtenidos en campo se complementa la bitácora de medición y se obtienen los datos necesarios para el cálculo de las demás variables que interesa conocer. Se generan tablas y gráficas correspondientes a los puntos donde se localizan las estacas sobre el glaciar de Ayoloco (Figura 38). Con base en éstos se estima las componentes de movimiento absoluto, la tasa de movimiento absoluto y los errores para cada uno de estos puntos, los cuales permiten conocer cómo es que se comportan las estacas sobre el glaciar (Apéndice III, IV, V, VI y VII).

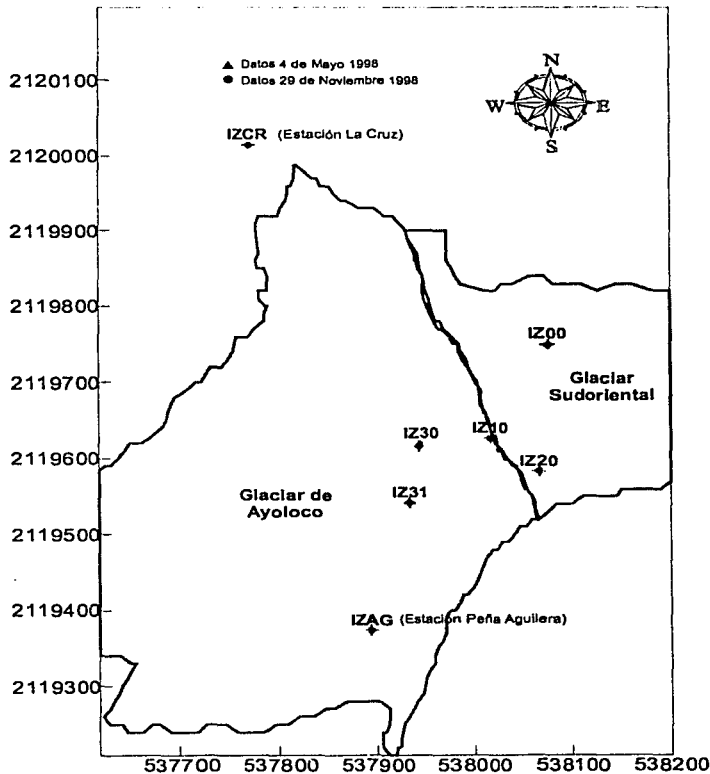


Figura 38. Gráfica de Ubicación de Estacas en el Volcán Iztaccíhuatl en Coordenadas UTM Mayo – Noviembre.

Con el propósito de determinar el desplazamiento del glaciar se obtuvo el cálculo de la componente de movimiento absoluto y la tasa de movimiento (velocidad) para el periodo de medición de 209 días y un año, con el fin de realizar una comparación, lo cual se interpreta que en 209 días entre una medición y otra, para el punto IZ30 su componente de movimiento absoluto fue 4046.420 mm y la tasa de movimiento absoluto de 19.361 mm/día siendo la única estaca que presenta un movimiento significativo tanto en este periodo como en un año suponiendo las mismas condiciones (Tabla 3 y Apéndice III, IV).

| Tasa de Movimiento |               |              |                |                |              |
|--------------------|---------------|--------------|----------------|----------------|--------------|
| P.V.               | m/d           | mm/d         | mm/209días     | mm/año         | m/año        |
| IZ00               | 0.0005        | 0.524        | 109.493        | 191.220        | 0.191        |
| IZ10               | 0.0014        | 1.432        | 299.197        | 522.521        | 0.522        |
| IZ20               | 0.0012        | 1.172        | 244.850        | 427.609        | 0.427        |
| <u>IZ30</u>        | <u>0.0194</u> | <u>19.36</u> | <u>4046.42</u> | <u>7066.71</u> | <u>7.066</u> |
| IZ31               | 0.0011        | 1.103        | 230.562        | 402.656        | 0.402        |

Tabla 3 . Muestra la tasa de movimiento para los diferentes puntos (estacas), para el periodo de la campaña de medición y para un año.

Con respecto a los demás puntos, el error de la componente de movimiento absoluto se encuentra dentro la línea cero, por ello su movimiento no es significativo y se aprecia que IZ30 es el único punto que sobrepasa esta línea por más de 3 m quedando fuera de este rango ( Figura 39).

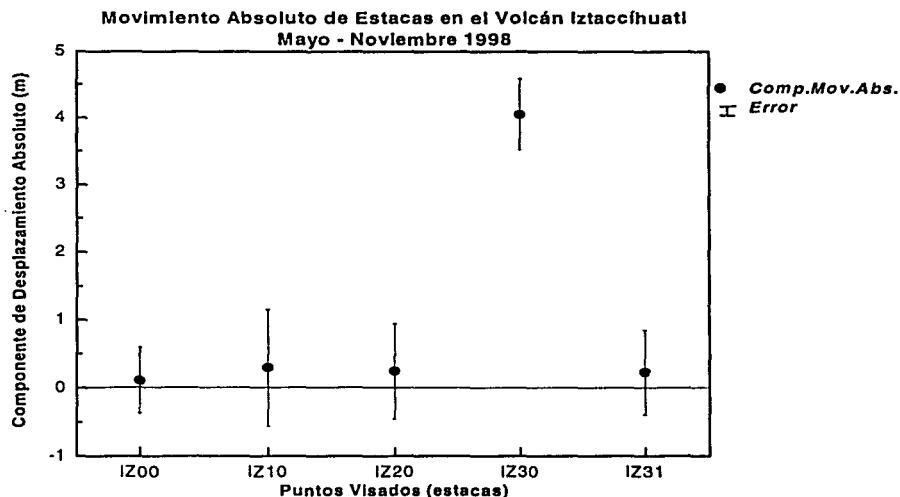


Figura 39. Gráfica de los puntos ubicados en el glaciar de Ayoloco con respecto a la componente de movimiento, en donde se muestra que IZ30 es la única estaca que presenta un movimiento significativo.

Los datos de las estacas correspondientes al 4 de mayo y 29 de noviembre de 1998 muestran lo siguiente: por medio de la comparación de la diferencia de distancia respecto al error analítico que se obtuvo entre una medición y otra, el único punto que presentó una diferencia mayor al error analítico fue IZ30 (Apéndice VII), que se interpreta como un movimiento significativo, este punto se está desplazando hacia el SW con una componente de magnitud mayor de 4 m, que se obtuvo de la diferencia de las coordenadas (UTM) en X, Y, y con una relación trigonométrica (Figura 40). Este comportamiento se esperaba, por la inclinación que se observa en esta parte del glaciar hacia dicho lado y las estacas ahí colocadas se encuentran en la parte frontal del glaciar de Ayoloco en donde la pendiente se hace más pronunciada.

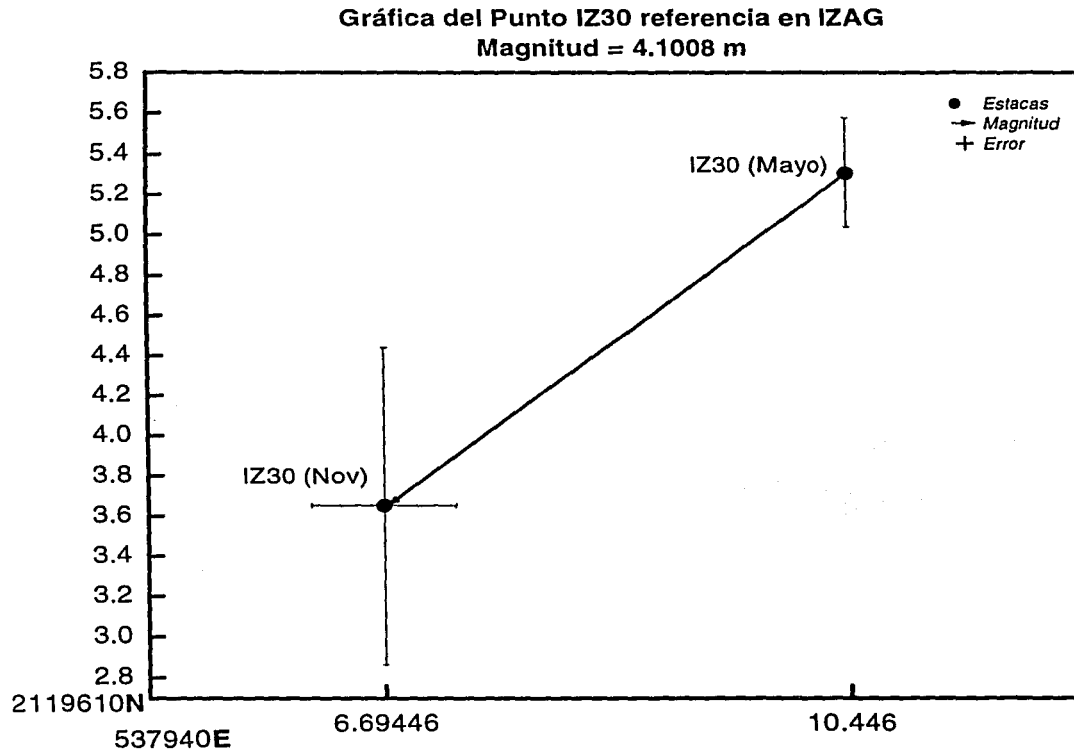


Figura 40. Gráfica en donde se observa el desplazamiento de IZ30 hacia el SW quedando fuera del error analítico por lo cual presenta un movimiento significativo. Las unidades de ambos ejes están dadas en metros.

Con respecto a los demás puntos, éstos presentan una diferencia menor al error analítico, por lo tanto se observa que prácticamente no tienen un movimiento (Apéndice VII).

Por otro lado, realizando la comparación de la diferencia de altitud respecto al error analítico, IZ10 es el único punto que presenta una diferencia menor al error analítico de apenas 0.895 m, los demás puntos presentan una diferencia mayor al error analítico de 2.393 m para el punto IZ00, para el punto IZ20 de 2.014 m, de 1.171 m para el punto IZ30 y finalmente para el punto IZ31 de 1.487 m, que interpretando, la disminución (ablación) del glaciar en dichos puntos es significativa con una componente de entre 1 y 2 m (Apéndice VII).

Con respecto al perímetro, se obtiene del polígono que forman las estacas del cual se conocen las magnitudes de algunos de sus lados, se divide en dos triángulos para obtener por medio de trigonometría los lados desconocidos y determinar el área que limitan las estacas por las formulas:

$$\text{Perímetro: } P = (a+b+c)/2$$

$$\text{Área: } \sqrt{P(P-a)(P-b)(P-c)}$$

El volumen se determina con la multiplicación del área total del polígono que delimitan las estacas por la ablación o espesor, que se calculo de la comparación de la diferencia de altitud de las diferentes fechas de medición.

Los resultados que se obtuvieron del área estimada que limitan las estacas ubicadas en el glaciar de Ayoloco de aproximadamente 11,110.01 m<sup>2</sup> (Figura 41) y el volumen calculado que se ha perdido es de 17,687.13 m<sup>3</sup>, se puede apreciar que la ablación de 1.6 m en este periodo en el que se realizaron las mediciones es fuerte, aunque no es representativa por que solo se trata de una pequeña parte del glaciar, no obstante nos proporciona un parámetro realista de cómo están siendo afectados los glaciares por diversos factores (Tabla 4).



| Vértices del Polígono        | Perímetro (m) | Área (m <sup>2</sup> ) | Volumen (m <sup>3</sup> ) | Ablación (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ) |
|------------------------------|---------------|------------------------|---------------------------|--|
| IZ00, IZ10, IZ20, IZ30, IZ31 | 348.10        | 11,110.01              | 17,687.13                 | 1.6  |

Tabla 4. Muestra los datos del área y volumen calculados para la zona que limitan las estacas en el glaciar de Ayoloco en el periodo comprendido entre mayo y noviembre de 1998.

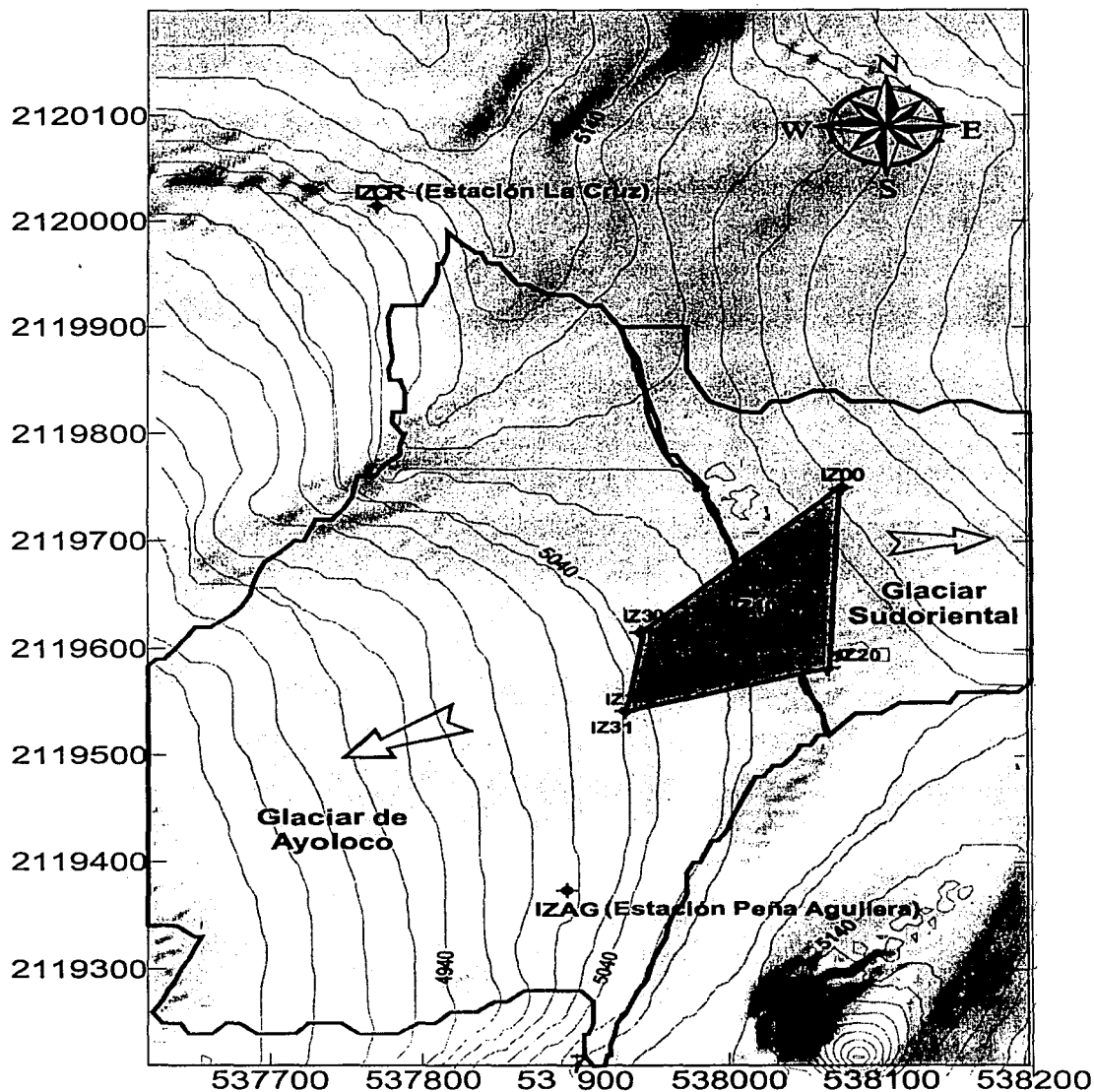


Figura 41. Mapa en donde se muestra la ubicación de las estaciones, el área limitada por las estacas en el glaciar y la delimitación de los glaciares. Las flechas indican la dirección de desplazamiento de los glaciares.

## VI. DISCUSIÓN.

El área glaciada actual del volcán Iztaccíhuatl ha sido modificada en forma sustancial. En particular, los glaciares que se encuentran en las laderas se han adelgazado y reducido de manera notable e inclusive desaparecido como es el caso del glaciar del Cuello, San Agustín y otros están próximos a desaparecer como el glaciar Atzintli, Centro-Oriental y Nororiental, de manera que se pueden considerar como glaciares en un franco proceso de extinción, de ahí la importancia de su estudio y reconocimiento. Principalmente debe estudiarse los más grandes (Sistema del Pecho y La Panza), y por esta razón enfocamos estos estudios al glaciar de Ayoloco y al glaciar Sudoriental (Apéndice VIII).

El área del glaciar de Ayoloco y Sudoriental es en realidad un sólo cuerpo glacial y pertenece al sistema denominado de La Panza, que muestra notables modificaciones que han descubierto rasgos que anteriormente no se apreciaban y de igual forma rasgos que se han perdido y no se observan en la actualidad (Apéndice VIII).

La parte frontal del glaciar de Ayoloco es muy irregular, en algunas ocasiones se presenta como una pared de hielo muy escarpada y agrietada formando un arco convexo al este y en otras ocasiones se presenta como una rampa con placas de hielo de pendiente variable, pero regularmente muy pronunciada formando un arco cóncavo al poniente (Figura 42).

En general, cuando las nevadas son escasas, la acumulación es poca y la nieve que cubre al glaciar se funde en la época de ablación, lo cual permite apreciar grietas en toda el área del glaciar principalmente en la zona central y frontal en donde el desplazamiento del glaciar es relativamente mayor según se comprobó con el movimiento de las estacas (Apéndice IV, VII), pero una grieta muy característica (rimaya) se puede observar de igual forma en algunas

ocasiones al norte del glaciar de Ayoloco cercana a la arista que limita esté con el glaciar Centro-Oriental (Figura 43), producto del desplazamiento del glaciar y el contacto del hielo con la pared de forma similar a un circo.

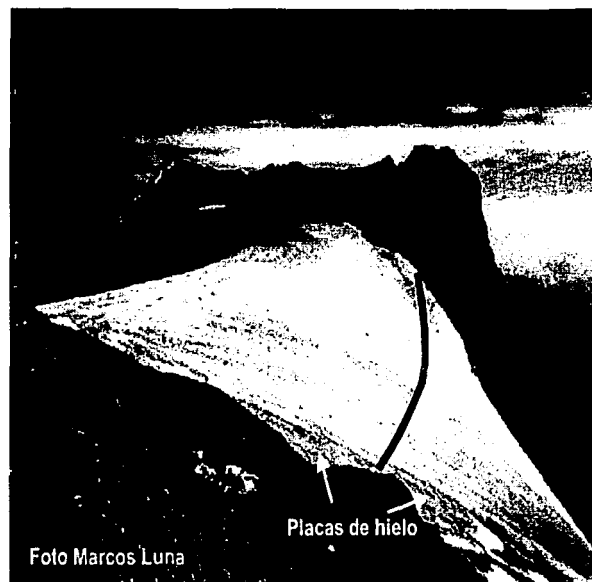
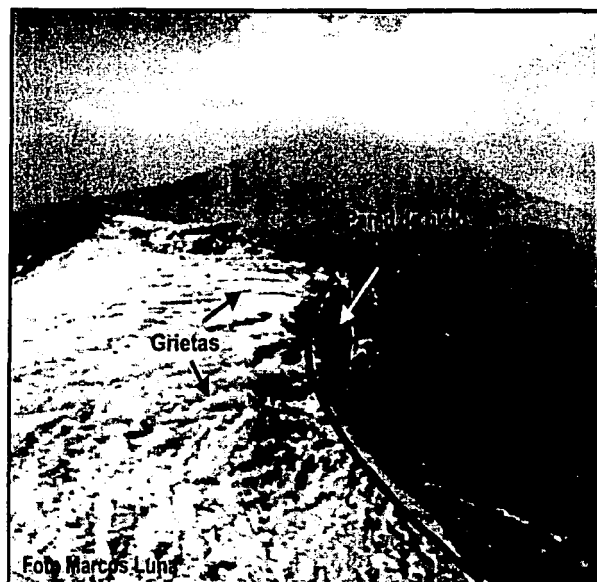


Figura 42. En la figura de la izquierda se observan los patrones de grietas y la pared de hielo, del lado derecho se aprecian las placas de hielo que se forman y la rampa de pendiente variable.

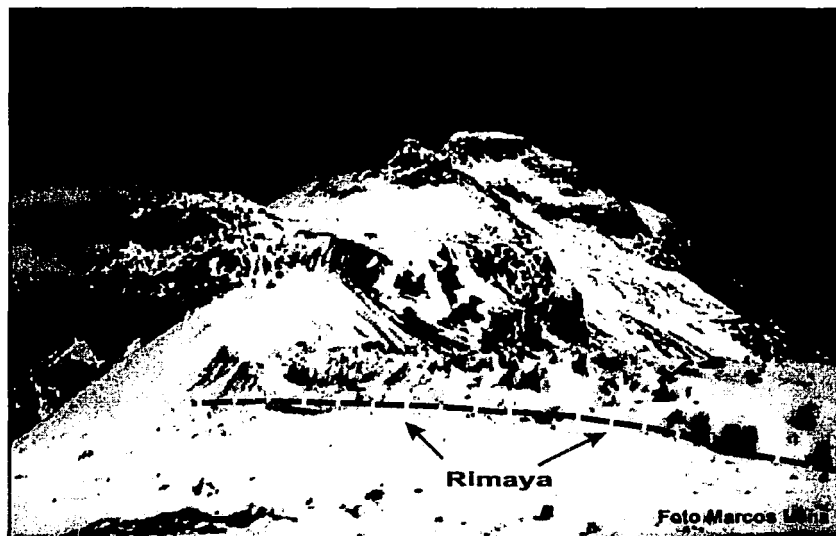


Figura 43. Se observa la grieta (rimaya) que se forma por el movimiento del glaciar.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La instalación de estacas y los métodos geodésicos que se emplearon son una herramienta útil en la determinación de velocidades en la superficie del hielo, aunque el procedimiento no es sencillo por las condiciones de accesibilidad, climáticas y algunas veces de los recursos con los que se cuenta para las campañas e implica mucho trabajo de campo como ya se describió en capítulos anteriores, por ello solo se pudieron obtener datos de dos campañas, el 4 de mayo y el 29 de noviembre realizadas en 1998, lo cual permite calcular únicamente un vector de velocidad por cada estaca que se tiene en el glaciar entre estas dos campañas.

Con el propósito de evaluar la confiabilidad de los datos obtenidos, se realizó el ejercicio de estimar el error bajo las siguientes consideraciones. Los errores son estadísticamente independientes, debido a que corresponden a pasos no relacionados directamente con el proceso de generación de los datos.

Para estimar el error total, se consideraron los errores generados en los siguientes pasos del proceso: errores en el proceso de la toma de mediciones (exactitud), que corresponde a la aproximación del valor real al tomar datos como distancias, ángulo vertical, ángulo horizontal y los que corresponden al GPS (altitud, distancia horizontal, posición vertical) (Apéndice V, VI).

El error que se genera al tomar las distancias, se calcula por medio de la desviación estándar de cada conjunto de series de mediciones tomadas para ese punto, se obtiene el error estándar de cada punto para ambas fechas.

El error para el ángulo vertical y horizontal, se obtiene de la desviación estándar del conjunto de series de datos para cada ángulo, se obtiene el error estándar para cada ángulo, y en ambas fechas.

Para determinar los errores de exactitud se aplicaron las siguientes formulas:

$$\text{Desviación estándar: } s = [n \sum x^2 - (\sum x)^2] / n(n-1)$$

$$\text{Error estándar: } sm = s / \sqrt{n}$$

El error que desprende la toma de datos con el GPS para nuestro caso en la medición de los puntos con GPS en el glaciar, van desde  $\pm(50cm+1ppm)$  hasta  $\pm(5mm+1ppm)$ , para trabajos que requieren mediciones muy exigentes (Wolf y Brinker, 1998).

Con respecto al error a priori o estimación del error de precisión, que corresponde a las especificaciones de los instrumentos, se obtiene de multiplicar la distancia por el factor de corrección (5 mm + 5 ppm \* d) o (5 mm + 0.000005 \* d) para cada fecha y posteriormente se obtiene el promedio entre dichas fechas, que es finalmente el error para esa medición (Apéndice VI).

Para nuestro caso, en la medición de los puntos con GPS en el glaciar, el método que se utilizo es el estático y con GPS del tipo geodésico y topográfico. Las coordenadas UTM se obtienen a partir de la medición con GPS de los puntos de estación. En el Iztaccíhuatl la posición de las estaciones base se determino con GPS, por lo que se pudieron propagar las coordenadas a los puntos medidos desde cada estación, por ello el error que se desprende por tomar la posición únicamente de estos puntos no influye en la determinación del fenómeno que se quiere cuantificar.

Para determinar el error total se aplico la siguiente formula:

$$Et = \sqrt{(E_1)^2 + (E_2)^2 + (E_3)^2 + \dots + (E_n)^2}$$

Los datos obtenidos para mayo - noviembre de 1998 muestran una tendencia de retroceso y por lo que se puede observar un balance negativo por el poco desplazamiento que han presentado los puntos (estacas) situados en el glaciar durante este periodo, sin embargo se observa una ligera fluctuación en uno de los puntos (IZ30), siendo la única estaca que presenta un movimiento significativo (Apéndice VIII). Con respecto a los demás puntos, el error de la componente de movimiento absoluto es mayor, por ello su movimiento no es significativo.

Con esto se observa que la estaca IZ30 que se localiza en la parte mas próxima a la pendiente del glaciar de Ayoloco es la que presentan un movimiento mayor, esto puede ser consecuencia de que durante la época de lluvias se presenta la mayor acumulación (junio a noviembre) que cubre casi todo el periodo entre el cual las campañas de medición se realizaron y esto propicia el crecimiento del glaciar y su desplazamiento, mientras que la mayor ablación ocurre preferentemente de marzo a junio, y la campaña de medición se realizó a finales de este periodo y el retroceso parece ser mínimo, lo cual no quiere decir que la ablación no esté afectando al glaciar, pero no es la misma en todos los puntos, porque la reducción del glaciar en este periodo, indica que el balance de masa del glaciar es negativo debido a que la precipitación en la etapa de acumulación es menor que las pérdidas de masa que se están presentando en la época de ablación.

Al realizar la comparación de la diferencia de altitud respecto al error analítico, IZ10 es el único punto que presenta una diferencia menor a este error, sin embargo los demás puntos presentan una diferencia mayor al error analítico que interpretando, la ablación del glaciar en dichos puntos es significativa con una componente de entre 1 y 2 m (Apéndice VII).

Sin embargo, IZ30 es el único punto que presenta un movimiento significativo en la horizontal, y nos indica que el glaciar se está moviendo por una carga criostática preexistente más el empuje que ejerce el glaciar hacia fuera por el ángulo que presenta la pendiente. Porque, aunque existe acumulación de nieve, ésta no es de importancia en la carga ejercida (Figura 44), ya que la estacas deberían presentar un hundimiento y por el contrario éstas tienden a doblarse y a ser expulsadas, lo que indica que la ablación es mayor y el espesor del glaciar se encuentra disminuyendo como se observa en los datos de la Tabla 4 y Apéndice VII.

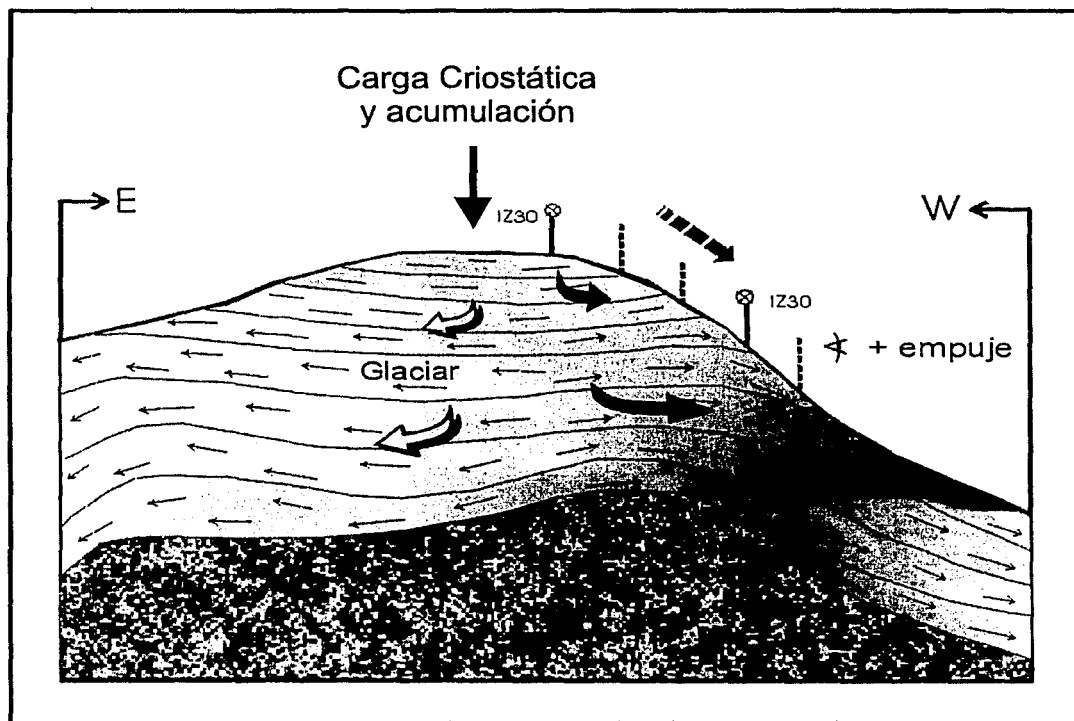


Figura 44. Muestra la carga que ejerce el glaciar y la influencia que tiene la pendiente en el desplazamiento de las estacas en la parte frontal.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La estimación del área que limitan las estacas ubicadas en el glaciar de Ayoloco de aproximadamente  $11,110.01 \text{ m}^2$  y el volumen calculado que se ha perdido por ablación es de  $17,687.13 \text{ m}^3$ , se puede apreciar que en este periodo en el que se realizaron las mediciones que la disminución es fuerte en promedio de 1.6 m, aunque no es representativa porque solo se trata de una pequeña parte del glaciar, y para tener un parámetro más real se tendrían que colocar estacas en los límites del glaciar y así lograr tener un control mas preciso, sin embargo nos proporciona un parámetro de cómo realmente los glaciares están siendo afectados por diversos factores (Tabla 4).

El comportamiento de las estacas con base en los resultados obtenidos, nos indican que la división que realizo (Lorenzo, 1964) del glaciar de La Panza no es una línea como el suponía, si no se trata de una franja que varía en espesor y forma, como se muestra en la Figura 45.

Durante el periodo de las campañas de medición en el glaciar de La Panza, se percibió un fuerte olor a azufre que proviene de la parte baja del glaciar Centro-Oriental, y se puede constatar por la presencia de un machón de color amarillizo y la ausencia de hielo o nieve en dicha parte, que indica la presencia de un campo de emanación de gas, tal manifestación actualmente se están tratando de monitorear.

Es importante señalar la presencia de gas en este campo en la parte cercana al glaciar de La Panza y habría que realizar estudios para corroborar si está afectando al glaciar y que tanto, porque la aparición de patrones inusuales en las grietas, deformación del hielo o cambios de espesor pueden ser indicadores de un incremento en el flujo de calor asociado a las diversas manifestaciones de la actividad volcánica, y este es un factor que puede contribuir al retroceso de los glaciares (Major y Newhall, 1989).



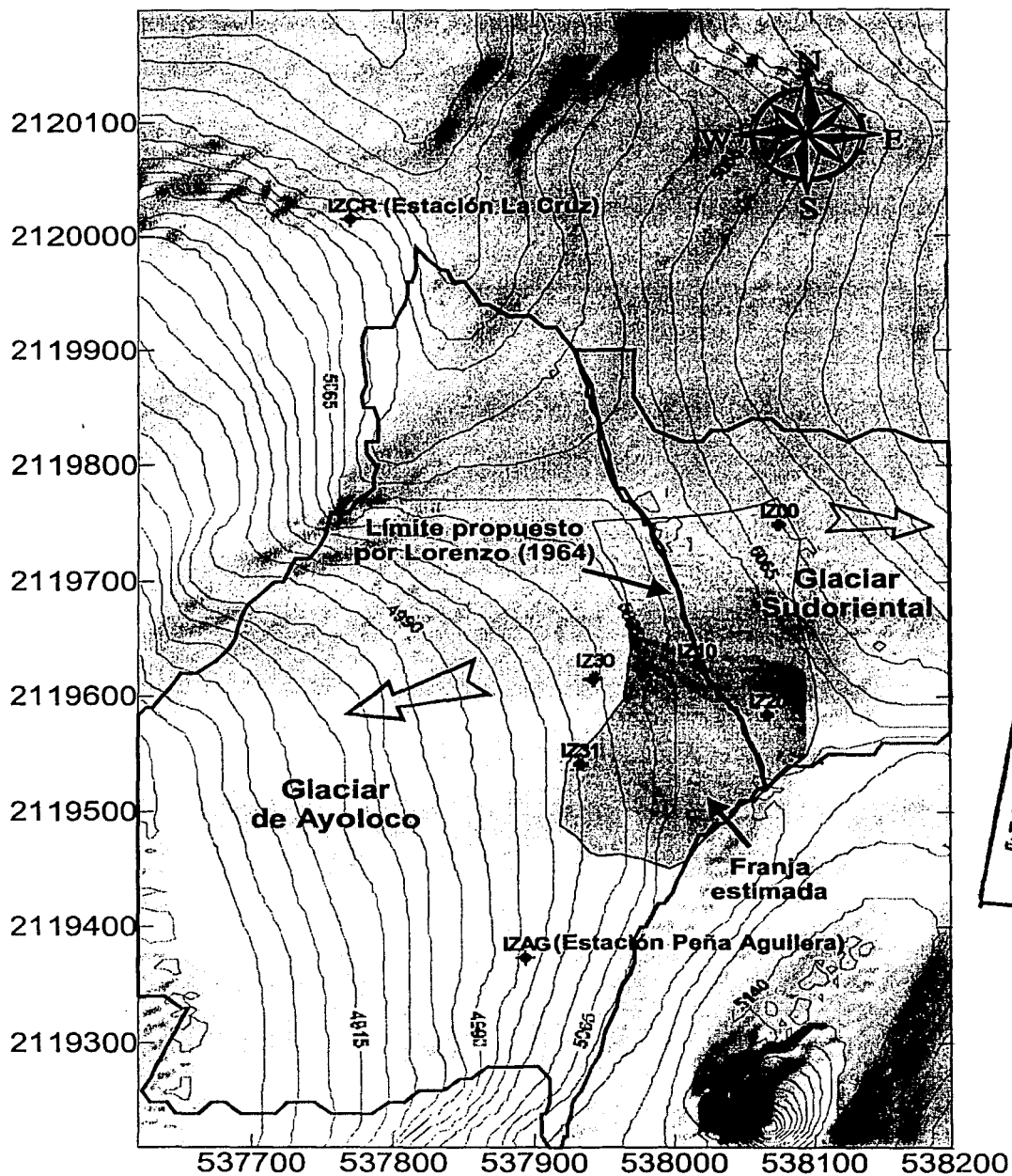


Figura 45. Muestra la franja que delimita a los glaciares propuesta en base al movimiento observado de las estacas.

Por otra parte, con respecto a la actividad volcánica del volcán Popocatépetl dada su cercanía con el Iztaccíhuatl, y los eventos explosivos asociados a la destrucción de los domos (Sheridan et al., 2001), ha habido emisión de material piroclástico (principalmente cenizas), que se registraron en el año de 1998, particularmente (18 de abril, 6 de junio, 3 de agosto, 3 y 16 de octubre, 9 de noviembre), que generaron columnas eruptivas de 2 Km. o más, durante las cuales se reportó caída de cenizas.

Es posible que cambios en la dirección del viento pudieran hacer que las columnas se desviaran hacia el norte pasando ligeramente encima del volcán Iztaccíhuatl propiciando caída de cenizas sobre el glaciar, ya que el efecto que el material piroclástico produce sobre la masa glacial, al parecer depende del espesor.

Driedger (1981), comenta que espesores iguales o menores a 5 mm favorecen la ablación, y espesores entre 5 y 25 mm la inhiben, por lo que es factible que de haberse formado una capa de ceniza sobre los glaciares del Iztaccíhuatl tendría que ser menor a 5 mm, ya que para el volcán Popocatépetl Martín Del Pozo et al. (1995), registró el mayor espesor de 20 mm y esta capa jugara un papel importante, al favorecer la ablación o provocar la extensión de la masa glacial al protegerla de la ablación en caso de ser mayor el espesor, y esto suma los efectos del factor climático y la actividad volcánica como un factor que altera la dinámica de las masas glaciares (Major y Newhall, 1989).

El balance negativo en un glaciar es consecuencia del predominio del proceso de ablación sobre el de acumulación, las consecuencias pueden ser: disminución en el área y espesor, pérdida en la capacidad de flujo y retroceso altitudinal del glaciar (Benn Y Evans, 1998).

Los glaciares tienen un avance y un retroceso en respuesta a los cambios en el clima (Paterson, 1994). Los glaciares y sus variaciones son excelentes indicadores del clima en una región, por lo cual es muy importante su estudio. Para esto, se necesita un análisis previo de las condiciones climáticas de la zona así como sus variaciones para después comparar estas fluctuaciones glaciales. El clima, es el primer factor a considerar para explicar el aumento en las tasas de retroceso de los glaciares.

En el ámbito mundial, la temperatura se ha incrementado en aproximadamente 0.5 °C. Los seis años más calientes ocurrieron en los 90s, el año más cálido del siglo fue 1998. No hay duda, de que la temperatura ha aumentado en el siglo XX y que esta tendencia se ha acelerado al final del siglo (Gutzler, 2000).

También existen fenómenos que provocan fluctuaciones climáticas y que por lo tanto podrían contribuir al retroceso glacial, como es el caso de El Niño y La Niña. Ya que el fenómeno de El Niño provoca lluvias en regiones donde generalmente llueve poco, mientras que llueve menos en las regiones de abundante precipitación y este se ha presentado en 1997-98, periodo en el cual se llevó a cabo la campaña de medición.

En el caso específico del clima de la región del Iztaccihuatl, Ortega del Valle (2001) analizó datos meteorológicos de las estaciones en el área, observó que la temperatura tiende a aumentar y la precipitación a disminuir (Figura 37). La tendencia de la temperatura en la región coincide con el aumento de la temperatura global señalado por Gutzler (2000).

Asimismo, el clima en la región del Volcán Iztaccihuatl puede ser afectado por su cercanía a la Ciudad de México y todos los efectos de contaminación que ello implica, incluyendo la inminente deforestación que se registra visiblemente en las zonas boscosas aledañas.

En general, la respuesta que tienen los glaciares, ante las condiciones climáticas y posiblemente la afectación de la actividad volcánica por su cercanía con el volcán Popocatepetl, ha sido la pérdida de movimiento, adelgazamiento y fusión desigual de la masa glacial.

## VII. CONCLUSIONES.

1. Generalmente el método más utilizado para medir las velocidades en la superficie del hielo, es empleando técnicas de geodesia tradicional para cuantificar el movimiento relativo entre estaciones o puntos de control que se colocan en los glaciares. Estos estudios generan datos de tipo discreto, ya que no es fácil mantener un equipo humano en operación continua debido principalmente al costo de su mantenimiento, las difíciles condiciones ambientales y el alto riesgo implícito en los volcanes que se encuentran en actividad si es el caso.
2. Los métodos geodésicos que se emplearon, son técnicas relativamente sencillas que aplicadas a la determinación de las velocidades de la superficie del hielo permiten determinar de una manera confiable los cambios de movimiento que se producen en el glaciar.
3. La realización de las mediciones a partir de los vértices que originalmente se habían previsto para el monitoreo, permitió trabajar de manera eficaz, lamentablemente algunas estacas se encontraron muy inclinadas o tiradas y no se logro medir las distancias. Por lo cual la determinación con direcciones no produjo una medición confiable y por lo tanto una precisión no muy buena. Por estas razones se decidió no incluirlas.
4. El error total permite estimar la precisión de las mediciones realizadas y el único punto que se encuentra fuera del rango del error analítico es IZ30, para éste su componente de movimiento absoluto fue 4046.420 mm y la tasa de movimiento absoluto de 19.361 mm/día, siendo la única estaca que presenta un movimiento significativo hacia el SW con una componente mayor de 4 m. Con relación a los otros puntos, estos presentan una diferencia menor al error analítico, por lo tanto estos no presentan un movimiento.

5. El único punto que presenta un movimiento significativo en la horizontal es IZ30 y nos indica que el glaciar se está moviendo por una carga criostática preexistente más el empuje que ejerce el glaciar hacia fuera por el ángulo que presenta la pendiente, la acumulación de nieve no es significativa, debido a que las estacas no presentan un hundimiento y por el contrario son expulsadas, lo que indica que la ablación es mayor y el espesor del glaciar se encuentra disminuyendo según los datos que arrojaron los cálculos.
6. El comportamiento de las estacas, con base en los resultados obtenidos, nos indican que la división que realizó Lorenzo en 1964 del glaciar de La Panza no es una línea como el suponía, si no se trata de una franja que varía en espesor y forma.
7. Para campañas de medición en el futuro, según los resultados obtenidos, las estacas deberán situarse más al centro en la parte frontal del glaciar de Ayoloco en donde la pendiente se hace más pronunciada, porque dichos puntos son los que registraron un desplazamiento mas significativo; por otro lado esto dificulta el trabajo de campo por las áreas de grietas y otras partes con dificultades en el glaciar con pendiente muy pronunciada. Estos factores, deben de considerarse para la instalación y localización de las estacas por razones de seguridad.
8. La tendencia de aumento gradual de la temperatura, combinada con la disminución de la precipitación, es junto con otros factores, las responsables de las modificaciones del tamaño de los glaciares, pues los glaciares revelan ser vulnerables al cambio climático.
9. En general, la respuesta que tiene los glaciares, ante las condiciones climáticas y posiblemente la afectación de la actividad volcánica por su cercanía con el volcán Popocatépetl, ha sido la perdida de movimiento, adelgazamiento y fusión desigual de la masa glaciar.

## REFERENCIAS.

Ahlmann, H. W: son 1948, Glaciological Research on the North Atlantic Coasts, Royal Geog. Soc. Research Ser., IV; 1 London.

Blasquez; L: Luis, 1961, Los Glaciares de México, Boletín No. 61, Instituto de Geología, UNAM, pp. 93-108.

Benn, I.J., and Evans, J.A., 1998, Glaciers and Glaciation, Arnold Publishers, 1a ed., 734 p.

Delgado, H., 1993, The Glaciers of Popocatepetl Volcano (México): changes and causes. First International Conference on Climatic Changes in México, Taxco, Guerrero, México, Abstracts, pp. 27.

Driedger, C., 1981, Response of Glaciers to the Eruptions of Mount St. Helens, in Litman, P.W. y Mullineaux, D.R., (Eds.), The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington, Us, pp. 757-760.

Embleton and King, 1968, Glacial and Periglacial Geomorphology, Arnold Publishers Ltd., 608 p.

Guillén M. A., 1996, Geomorfología de la Vertiente Occidental del Volcán Iztaccíhuatl, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, UNAM, 180 p.

Gutzler, D.S., 2000, Evaluating Global Warming: A Post-1990s Perspective, GSA Today, vol. 10, No. 10, pp. 2-7.

Holmes, 1980, Principles of Physical Geology, Thomas Nelson and Sons Ltd; Inglaterra., 812 p.

Jáuregui, E., (2000), El Clima de la Ciudad de México, Temas Selectos de Geografía de México, 1.Textos Monográficos: 4.Urbanización, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp.31-74.

Julio Miranda P., 2001, Cambios Recientes del Área Glaciada del Volcán Popocatepetl Mediante el Uso de la Fotografía Digital, Instituto de Geofísica, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, Tesis de Maestría, 48 p.

Lorenzo, J.L., 1964, Los Glaciares de México, UNAM, Instituto de Geofísica, 114 p.

Martín Del Pozo, A.L., Espinasa-Pereña, R., Armienta, M.A., Aguayo, A., Reyes, M., Sánchez, G., Cruz, O., Cenicerros, N., Lugo, J., González, V., Butrón, M.A., Villareal, M., 1995, La Emisión de Cenizas y Variaciones Geoquímicas Durante Diciembre-Marzo en el Volcán Popocatepetl, estudios Durante la Crisis de 1994-1995, CENAPRED (Secretaría de Gobernación)- UNAM, pp. 285-294.

Magaña V, 1999, Los Impactos de El Niño en México, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, DGPC, SG. pp. 1-62.

Major J.J and Newhall G.C., 1989, Snow and Ice Perturbation During Historical Volcanic Eruptions and the Formation of Lahars and Floods, Bull Volcanol 52, pp. 1-27.

Menzies, J., 1995, Modern Glacial Environments, Processes, dynamics and sediments, Vol. 1, Ed. Butterworth Heinemann, 621 p.

Ordoñez, E., 1894, Notas Acerca de los Ventisqueros del Iztaccíhuatl, Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate, No. 8, pp. 31-42.

Ortega del Valle, S., 2001, Las Variaciones Climáticas en la Región Central de México, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, UNAM, Tesis de Licenciatura, 95 p.

Østrem and Brugman, M 1991, Glacier Mass-Balance Measurements, NVE Canada, 224 p.

Paredes T., 1925, Circulación de las Aguas Subterráneas en la Falda Occidental del Iztaccíhuatl, Anales del Instituto de Geología, UNAM, Vol.2, No. 1-3, pp 18-37.

Paterson, W.S.B., 1994, The Physics of Glaciers, 3<sup>rd</sup> edition. Pergamon, Oxford. 477 p.

Robinson, 1990, Geología Física Básica, Ed. Noriega., 699 p.

Robles R., 1944, Algunas Ideas Sobre la Glaciología y Morfología del Iztaccíhuatl, Revista Geográfica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Vol. 4, No.10,11,12, pp. 65-98.

Sharp, 1988, Living Ice: Understanding Glaciers and Glaciation, Cambridge University Press, 225 p.

Sheridan, M., Hubbard, B., Bursik, M., Abrams, M., Siebe C., Macías, J.L., Delgado, H., 2001, EOS, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 82, No. 16, pp. 185-189.



Sokkia Co., LTD., 1995, Operator's Manual Surveying Instruments, 1-1 Tomigaya 1-Chome, Shibuya-ku, Tokyo, 151 Japan.

Solis R., Nolasco, Victoria, 1994, Geometría Analítica, Facultad de Ingeniería, UNAM, Ed Limusa, pp 3-27.

Turnbull E., 1897, El Popocatépetl y los Volcanes de México, Boletín de la Sociedad de Geografía y Estadística, 4a Época, Vol IV, pp. 50-72.

Vizcayno F., Bistrain P., 1943, Aprovechamiento de las Aguas Provenientes del Deshielo de los Volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl, para la Generación de Energía Eléctrica, Irrigación en México, Vol. 24, No. 3, Mayo-Junio, pp. 5-18.

White S., 1956, Geological Notes: Probable Substages of Glaciation on Iztaccíhuatl, México, Journal of Geology, Vol.64, No. 3, pp. 289-295.

White, S. E., 1962, El Iztaccíhuatl Acontecimientos Volcánicos y Geomorfológicos en el Lado Oeste Durante el Pleistoceno Superior, México. Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 73, No. 8, pp. 935-958.

William O. Field, 1964, Notas: American Geographical Society.

Wolf P, and Brinker R, 1998, Topografía, 9ª. Ed., Alfaomega, pp. 99-505.

## **APÉNDICE I**

Tablas de datos que se obtuvieron en campo para el 4 de mayo  
y 29 de noviembre de 1998, con referencia en IZAG (Peña  
Aguilera) e IZCR (La Cruz).

## Relación de términos utilizados en las tablas.

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| <i>EST o ST</i>                  | estación.   |
| <i>PV</i>                        | punto visado o medido (referencia, punto en estudio, etc.).                       |
| <i>&lt; V</i>                    | ángulo vertical en grados sexagesimales o en gones.                               |
| <i>&lt; H</i>                    | ángulo horizontal en grados sexagesimales o en gones.                             |
| <i>d /</i>                       | distancia inclinada o directa entre el distanciómetro y el prisma, en metros.     |
| <i>Alt P o <math>\Phi</math></i> | altura del prisma sobre el punto medido, en metros.                               |
| <i>Temp. o T</i>                 | temperatura en grados centígrados.  |
| <i>Mbar o P</i>                  | presión en milibares (hectopascales).   |
| <i>D, I</i>                      | lectura en cara 1(D), lectura en Cara 2 (I).                                      |
| <i>Alt T o Á</i>                 | altura de instrumento desde la estación hasta el centro del teodolito, en metros. |
| <i>Alt dist</i>                  | es la distancia corregida por el seno del ángulo vertical.                        |
| <i>Alt ref.</i>                  | es una altura que se toma de referencia.  |
| <i>OBS</i>                       | observaciones.  |

\* Ver capítulo III, sección 4, página 66-68.

Tabla 5. Datos de campo del 4 de mayo de 1998 referencia en IZAG.

| EST  | PV   | H       | V       | d       | Alt T | Alt dist | Alt ref | Alt p | Mbar  | Temp |
|------|------|---------|---------|---------|-------|----------|---------|-------|-------|------|
| IZAG | IZCR | 388.952 | 2.330   | 653.351 | 0.822 | 1.016    | 1.027   | 1.027 | 816.5 | 11.5 |
| IZAG | IZCR | 188.948 | 2.332   |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZCR | 388.952 | 2.331   | 653.350 |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZCR | 188.948 | 2.333   |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZCR | 388.951 | 2.331   | 653.352 |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZCR | 188.951 | 2.330   |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ00 | 29.654  | -1.034  | 417.961 | 0.822 | 1.016    | 3.000   | 3.145 | 817.0 | 11.0 |
| IZAG | IZ00 | 229.654 | -1.034  |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ00 | 29.657  | -1.034  | 417.960 |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ00 | 229.654 | -1.034  |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ00 | 29.656  | -1.032  | 417.961 |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ00 | 229.653 | -1.032  |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ10 | 29.673  | -5.682  | 283.228 | 0.822 | 1.016    | 3.000   | 3.145 | 817.5 | 11.5 |
| IZAG | IZ10 | 229.672 | -5.674  |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ10 | 29.673  | -5.682  | 283.231 |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ10 | 229.671 | -5.676  |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ10 | 29.674  | -5.682  | 283.227 |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ10 | 229.670 | -5.676  |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ20 | 44.795  | -6.426  | 273.956 | 0.822 | 1.016    | 3.000   | 3.145 | 816.5 | 12.0 |
| IZAG | IZ20 | 244.796 | -6.423  |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ20 | 44.794  | -6.429  | 273.979 |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ20 | 244.796 | -6.425  |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ20 | 44.796  | -6.428  | 273.984 |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ20 | 244.795 | -6.426  |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ30 | 14.099  | -9.829  | 255.486 | 0.822 | 1.016    | 3.000   | 3.145 | 818.0 | 12.5 |
| IZAG | IZ30 | 214.099 | -9.828  |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ30 | 14.099  | -9.831  | 255.485 |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ30 | 214.099 | -9.827  |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ30 | 14.099  | -9.829  | 255.479 |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ30 | 214.099 | -9.826  |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ31 | 15.747  | -13.158 | 176.359 | 0.822 | 1.016    | 3.000   | 3.145 | 818.0 | 13.0 |
| IZAG | IZ31 | 215.744 | -13.151 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ31 | 15.746  | -13.158 | 176.351 |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ31 | 215.744 | -13.153 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ31 | 15.746  | -13.160 | 176.352 |       |          |         |       |       |      |
| IZAG | IZ31 | 215.744 | -13.154 |         |       |          |         |       |       |      |

Tabla 5 (continuación). Datos de campo 4 de mayo de 1998 referencia en IZCR.

| EST  | PV   | H       | V      | d       | Alt T | Alt dist | Alt ref | Alt p | Mbar  | Temp |
|------|------|---------|--------|---------|-------|----------|---------|-------|-------|------|
| IZCR | IZAG | 188.956 | -2.380 | 653.376 | 1.400 | 1.594    | 0.838   | 0.838 | 813.0 | 9.5  |
| IZCR | IZAG | 388.958 | -2.374 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZAG | 188.956 | -2.379 | 653.369 |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZAG | 388.956 | -2.373 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZAG | 188.957 | -2.378 | 653.367 |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZAG | 388.957 | -2.373 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ00 | 146.574 | -4.899 | 404.962 | 1.400 | 1.594    | 3.000   | 3.145 | 814.0 | 10.5 |
| IZCR | IZ00 | 346.572 | -4.895 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ00 | 146.575 | -4.897 | 404.963 |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ00 | 346.573 | -4.894 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ00 | 146.575 | -4.901 | 404.961 |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ00 | 346.572 | -4.894 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ10 | 165.024 | -6.853 | 461.279 | 1.400 | 1.594    | 3.000   | 3.145 | 814.5 | 10.0 |
| IZCR | IZ10 | 365.021 | -6.849 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ10 | 165.024 | -6.855 | 461.280 |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ10 | 365.022 | -6.848 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ10 | 165.023 | -6.855 | 461.280 |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ10 | 365.022 | -6.850 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ20 | 162.686 | -6.312 | 525.079 | 1.400 | 1.594    | 3.000   | 3.145 | 813.0 | 9.5  |
| IZCR | IZ20 | 362.687 | -6.306 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ20 | 162.687 | -6.311 | 525.074 |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ20 | 362.686 | -6.305 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ20 | 162.687 | -6.311 | 525.068 |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ20 | 362.685 | -6.305 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ30 | 174.491 | -9.332 | 435.846 | 1.400 | 1.594    | 3.000   | 3.145 | 814.0 | 9.5  |
| IZCR | IZ30 | 374.491 | -9.324 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ30 | 174.489 | -9.330 | 435.847 |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ30 | 374.489 | -9.324 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ30 | 174.490 | -9.329 | 435.849 |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ30 | 374.490 | -9.326 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ31 | 179.957 | -7.661 | 504.003 | 1.400 | 1.594    | 3.000   | 3.145 | 814.0 | 10.0 |
| IZCR | IZ31 | 379.956 | -7.658 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ31 | 179.958 | -7.661 | 504.009 |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ31 | 379.954 | -7.657 |         |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ31 | 179.956 | -7.661 | 504.007 |       |          |         |       |       |      |
| IZCR | IZ31 | 379.956 | -7.658 |         |       |          |         |       |       |      |

Tabla 6. Datos de campo del 29 de noviembre de 1998 referencia en IZAG.

| EST  | PV   | H       | V       | d       | Alt T | Alt dist | alt ref | Alt p | Mbar | Temp | Hora |
|------|------|---------|---------|---------|-------|----------|---------|-------|------|------|------|
| IZAG | IZCR | 0       | 2.33    | 653.37  | 0.850 | 1.044    | 1.236   | 1.236 | 590  | 5    |      |
| IZAG | IZCR | 200.002 | 2.336   | 653.37  |       |          |         |       | 590  | 5    |      |
| IZAG | IZCR | 0.002   | 2.331   | 653.37  |       |          |         |       | 590  | 5    |      |
| IZAG | IZCR | 200.002 | 2.337   | 653.37  |       |          |         |       | 590  | 5    |      |
| IZAG | IZCR | 0.001   | 2.328   | 653.37  |       |          |         |       | 590  | 5    |      |
| IZAG | IZCR | 200.001 | 2.338   | 653.37  |       |          |         |       | 590  | 5    |      |
| IZAG | IZ00 | 40.727  | -1.403  | 417.899 | 0.850 | 1.044    | 3.000   | 3.000 | 590  | 5    |      |
| IZAG | IZ00 | 240.73  | -1.398  | 417.899 |       |          |         |       | 590  | 5    |      |
| IZAG | IZ00 | 40.73   | -1.406  | 417.895 |       |          |         |       | 590  | 5    |      |
| IZAG | IZ00 | 240.728 | -1.402  | 417.895 |       |          |         |       | 590  | 5    |      |
| IZAG | IZ10 | 40.731  | -5.761  | 282.909 | 0.850 | 1.044    | 3.600   | 3.600 | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ10 | 240.731 | -5.754  | 282.909 |       |          |         |       | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ10 | 40.731  | -5.764  | 282.907 |       |          |         |       | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ10 | 240.728 | -5.752  | 282.907 |       |          |         |       | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ20 | 55.939  | -6.875  | 274.108 | 0.850 | 1.044    | 3.125   | 3.125 | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ20 | 255.939 | -6.866  | 274.108 |       |          |         |       | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ20 | 55.939  | -6.875  | 274.106 |       |          |         |       | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ20 | 255.94  | -6.865  | 274.106 |       |          |         |       | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ30 | 24.927  | -10.259 | 251.551 | 0.850 | 1.044    | 3.125   | 3.125 | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ30 | 224.928 | -10.252 | 251.541 |       |          |         |       | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ30 | 24.928  | -10.262 | 251.562 |       |          |         |       | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ30 | 224.929 | -10.258 | 251.563 |       |          |         |       | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ31 | 26.679  | -13.288 | 176.516 | 0.850 | 1.044    | 4.125   | 4.125 | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ31 | 226.676 | -13.284 | 176.516 |       |          |         |       | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ31 | 26.677  | -13.29  | 176.52  |       |          |         |       | 590  | 4    |      |
| IZAG | IZ31 | 226.678 | -13.283 | 176.52  |       |          |         |       | 590  | 4    |      |
| IZAG | IA30 | 24.981  | -9.791  | 255.27  | 0.850 | 1.044    | 3.125   | 3.125 | 590  | 3    |      |
| IZAG | IA30 | 224.978 | -9.782  | 255.27  |       |          |         |       | 590  | 3    |      |
| IZAG | IA30 | 24.979  | -9.785  | 255.277 |       |          |         |       | 590  | 3    |      |
| IZAG | IA30 | 224.978 | -9.779  | 255.277 |       |          |         |       | 590  | 3    |      |

Tabla 6 (continuación). Datos de campo del 29 de noviembre de 1998 referencia en IZCR.

| EST  | PV   | H       | V      | d       | Alt T | alt dist | Alt ref | Alt p | Mbar | Temp | Hora  |
|------|------|---------|--------|---------|-------|----------|---------|-------|------|------|-------|
| IZCR | IZAG | 0       | -2.374 | 653.374 | 1.441 | 1.635    | 0.850   | 0.850 | 580  | 3    | 11:50 |
| IZCR | IZAG | 199.999 | -2.376 | 653.374 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZAG | 0       | -2.373 | 653.374 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZAG | 199.998 | -2.374 | 653.374 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZAG | 0.001   | -2.375 | 653.375 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZAG | 199.999 | -2.377 | 653.375 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ00 | 357.629 | -5.264 | 405.39  | 1.441 | 1.635    | 3.125   | 3.125 | 580  | 3    | 12:05 |
| IZCR | IZ00 | 157.628 | -5.254 | 405.39  |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ00 | 357.629 | -5.264 | 405.39  |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ00 | 157.627 | -5.254 | 405.39  |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ10 | 376.102 | -6.886 | 461.507 | 1.441 | 1.635    | 3.600   | 3.600 | 580  | 3    | 12:24 |
| IZCR | IZ10 | 176.102 | -6.875 | 461.507 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ10 | 376.101 | -6.884 | 461.503 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ10 | 176.102 | -6.874 | 461.503 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ20 | 373.737 | -6.527 | 525.692 | 1.441 | 1.635    | 3.125   | 3.125 | 580  | 3    | 12:15 |
| IZCR | IZ20 | 173.736 | -6.516 | 525.692 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ20 | 373.735 | -6.527 | 525.69  |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ20 | 173.737 | -6.517 | 525.69  |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ30 | 385.979 | -9.407 | 438.627 | 1.441 | 1.635    | 3.125   | 3.125 | 580  | 3    | 13:10 |
| IZCR | IZ30 | 185.978 | -9.394 | 438.627 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ30 | 385.977 | -9.404 | 438.649 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ30 | 185.975 | -9.395 | 438.649 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ31 | 391.025 | -7.718 | 503.526 | 1.441 | 1.635    | 4.125   | 4.125 | 580  | 3    | 12:35 |
| IZCR | IZ31 | 191.021 | -7.708 | 503.526 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ31 | 391.024 | -7.718 | 503.526 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |
| IZCR | IZ31 | 191.024 | -7.706 | 503.526 |       |          |         |       | 580  | 3    |       |

## ***APÉNDICE II***

Tablas de datos calculados en gabinete a partir del procesamiento de los datos obtenidos en campo para el 4 de mayo y 29 de noviembre de 1998 con referencia en IZAG (Peña Aguilera) e IZCR (La Cruz).



## Relación de términos utilizados en las tablas.

|  |  |
|--|--|
| <i>EST o ST</i>  | estación.  |
| <i>PV</i>  | punto visado o medido (referencia, punto en estudio, etc.).  |
| <i>Hcorr</i>   | ángulo horizontal corregido.   |
| <i>Hsexag</i>  | ángulo horizontal transformado a grados sexagesimales y desglosado en grados, minutos y segundos.                            |
| <br>   |  |
| <i>Vsexag</i>  | ángulo vertical transformado a grados sexagesimales y desglosado en grados, minutos y segundos.                              |
| <i>Hprom.</i>  | ángulo horizontal promedio de la serie tomada.   |
| <i>Vprom</i>   | ángulo vertical promedio de la serie tomada.   |
| <i>dprom</i>   | distancia promedio de la serie tomada.   |
| <i>Hrad</i>  | ángulo horizontal transformado a radianes.   |
| <i>Vrad</i>  | ángulo vertical transformado a radianes.   |
| <i>dAlt</i>  | distancia corregida por el seno del ángulo vertical (distancia por la altura).   |
| <i>AltPV</i>   | altitud del punto visado.  |
| <i>mmHg</i>  | presión tomada y transformada en milímetros de mercurio.   |
| <i>ppm</i>   | partes por millón.   |
| <i>dhor</i>  | distancia horizontal.  |
| <i>dcorr</i>   | distancia horizontal corregida.  |
| <i>sen</i>   | seno del ángulo horizontal.  |
| <i>cos</i>   | coseno del ángulo horizontal.  |
| <i>x, y, z</i>   | coordenadas calculadas en metros.  |
| <i>Xcorr, Ycorr,</i>                                     | coordenadas corregidas de <i>x, y, z</i> .   |
| <i>Zcorr.</i>  |  |
| <i>X, Y, Z (UTM)</i>                                     | datos tomados de las mediciones del 1998 calculadas a partir de un <i>punto</i> de referencia.                               |
| <i>X<sub>Dif</sub>, Y<sub>Dif</sub>, Z<sub>Dif</sub></i> | diferencias en <i>x, y, z</i> tomadas de los datos de las coordenadas UTM de las dos diferentes fechas de medición del 1998. |

\* Ver capítulo III, sección 4 y 4.1, página 66-71.

Tabla 7. Datos de gabinete del 4 de mayo de 1998 referencia en IZAG.

| EST  | PV   | H corr  |          | H sexag |     |        | V sexag |          |     | H prom | V prom | d prom  | H rad   | V rad   | d Alt   |       |        |          |
|------|------|---------|----------|---------|-----|--------|---------|----------|-----|--------|--------|---------|---------|---------|---------|-------|--------|----------|
|      |      | (gonos) | (grados) | (°)     | (") | (')    | (gonos) | (grados) | (°) |        |        |         |         |         |         | (")   | (')    | (angulo) |
| IZAG | IZCR | 387.885 | 350.0568 | 350     | 3   | 24.48' | 2.097   | 87.90    | 87  | 54     | 10.8   | 388.952 | 387.883 | 2.331   | 653.351 | 6.093 | 0.037  | 23.920   |
| IZAG | IZCR | 187.881 | 170.0532 | 170     | 3   | 11.52' | 2.099   | 272.10   | 272 | 5      | 55.68  | 388.948 |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZCR | 387.885 | 350.0568 | 350     | 3   | 24.48' | 2.098   | 87.90    | 87  | 54     | 7.56   | 388.952 | 0.002   | 0.001   | 0.001   |       |        |          |
| IZAG | IZCR | 187.881 | 170.0532 | 170     | 3   | 11.52' | 2.100   | 272.10   | 272 | 5      | 58.92  | 388.948 |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZCR | 387.884 | 350.0559 | 350     | 3   | 21.24' | 2.098   | 87.90    | 87  | 54     | 7.56   | 388.951 |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZCR | 187.884 | 170.0559 | 170     | 3   | 21.24' | 2.097   | 272.10   | 272 | 5      | 49.2   | 388.951 |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ00 | 28.587  | 26.6886  | 26      | 41  | 18.96' | -0.931  | 90.93    | 90  | 55     | 50.16  | 29.654  | 28.588  | -1.033  | 417.961 | 0.449 | -0.016 | -6.784   |
| IZAG | IZ00 | 228.587 | 206.6886 | 206     | 41  | 18.96' | -0.931  | 269.07   | 269 | 4      | 9.84   | 29.654  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ00 | 28.59   | 26.6913  | 26      | 41  | 28.68' | -0.931  | 90.93    | 90  | 55     | 50.16  | 29.657  | 0.002   | 0.001   | 0.001   |       |        |          |
| IZAG | IZ00 | 228.587 | 206.6886 | 206     | 41  | 18.96' | -0.931  | 269.07   | 269 | 4      | 9.84   | 29.654  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ00 | 28.589  | 26.6904  | 26      | 41  | 25.44' | -0.929  | 90.93    | 90  | 55     | 43.68  | 29.656  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ00 | 228.586 | 206.6877 | 206     | 41  | 15.72' | -0.929  | 269.07   | 269 | 4      | 16.32  | 29.653  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ10 | 28.606  | 26.7057  | 26      | 42  | 20.51' | -5.114  | 95.11    | 95  | 6      | 49.68  | 29.673  | 28.605  | -5.679  | 283.229 | 0.449 | -0.089 | -25.232  |
| IZAG | IZ10 | 228.605 | 206.7048 | 206     | 42  | 17.28' | -5.107  | 264.89   | 264 | 53     | 36.24  | 29.672  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ10 | 28.606  | 26.7057  | 26      | 42  | 20.51' | -5.114  | 95.11    | 95  | 6      | 49.68  | 29.673  | 0.001   | 0.004   | 0.002   |       |        |          |
| IZAG | IZ10 | 228.604 | 206.7039 | 206     | 42  | 14.04' | -5.108  | 264.89   | 264 | 53     | 29.76  | 29.671  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ10 | 28.607  | 26.7066  | 26      | 42  | 23.75' | -5.114  | 95.11    | 95  | 6      | 49.68  | 29.674  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ10 | 228.603 | 206.703  | 206     | 42  | 10.80' | -5.108  | 264.89   | 264 | 53     | 29.76  | 29.67   |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ20 | 43.728  | 40.3155  | 40      | 18  | 55.80' | -5.783  | 95.78    | 95  | 47     | 0.24   | 44.795  | 43.728  | -6.426  | 273.973 | 0.687 | -0.101 | -27.610  |
| IZAG | IZ20 | 243.729 | 220.3164 | 220     | 18  | 59.03' | -5.781  | 264.22   | 264 | 13     | 9.48   | 44.796  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ20 | 43.727  | 40.3146  | 40      | 18  | 52.55' | -5.786  | 95.79    | 95  | 47     | 9.96   | 44.794  | 0.001   | 0.002   | 0.015   |       |        |          |
| IZAG | IZ20 | 243.729 | 220.3164 | 220     | 18  | 59.03' | -5.783  | 264.22   | 264 | 13     | 3      | 44.796  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ20 | 43.729  | 40.3164  | 40      | 18  | 59.04' | -5.785  | 95.79    | 95  | 47     | 6.72   | 44.796  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ20 | 243.728 | 220.3155 | 220     | 18  | 55.79' | -5.783  | 264.22   | 264 | 12     | 59.76  |         |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ30 | 13.032  | 12.6891  | 12      | 41  | 20.76' | -8.846  | 98.85    | 98  | 50     | 45.96  | 14.099  | 13.032  | -9.828  | 255.483 | 0.205 | -0.154 | -39.288  |
| IZAG | IZ30 | 213.032 | 192.6891 | 192     | 41  | 20.75' | -8.845  | 261.15   | 261 | 9      | 17.28  | 14.099  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ30 | 13.032  | 12.6891  | 12      | 41  | 20.76' | -8.848  | 98.85    | 98  | 50     | 52.44  | 14.099  | 0.000   | 0.002   | 0.004   |       |        |          |
| IZAG | IZ30 | 213.032 | 192.6891 | 192     | 41  | 20.75' | -8.844  | 261.16   | 261 | 9      | 20.52  | 14.099  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ30 | 13.032  | 12.6891  | 12      | 41  | 20.76' | -8.846  | 98.85    | 98  | 50     | 45.96  | 14.099  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ30 | 213.032 | 192.6891 | 192     | 41  | 20.75' | -8.843  | 261.16   | 261 | 9      | 23.76  | 14.099  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ31 | 14.68   | 14.1723  | 14      | 10  | 20.27' | -11.842 | 101.84   | 101 | 50     | 31.92  | 15.747  | 14.678  | -13.156 | 176.354 | 0.231 | -0.207 | -36.186  |
| IZAG | IZ31 | 214.677 | 194.1696 | 194     | 10  | 10.56' | -11.836 | 258.16   | 258 | 9      | 50.76  | 15.744  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ31 | 14.679  | 14.1714  | 14      | 10  | 17.04' | -11.842 | 101.84   | 101 | 50     | 31.92  | 15.746  | 0.001   | 0.004   | 0.004   |       |        |          |
| IZAG | IZ31 | 214.677 | 194.1696 | 194     | 10  | 10.56' | -11.838 | 258.16   | 258 | 9      | 44.28  | 15.744  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ31 | 14.679  | 14.1714  | 14      | 10  | 17.04' | -11.844 | 101.84   | 101 | 50     | 38.4   | 15.746  |         |         |         |       |        |          |
| IZAG | IZ31 | 214.677 | 194.1696 | 194     | 10  | 10.56' | -11.839 | 258.16   | 258 | 9      | 41.04  | 15.744  |         |         |         |       |        |          |

Tabla 7. (Continuación) Datos de gabinete del 4 de mayo de 1998 referencia en IZAG.

| Altitud PV | mm Hg   | ppm sokkia | dist corr. | dist. hor. | seno   | coseno | X       | Y        | Z        | X corr   | Y corr   | Z corr    | P V  | X UTM      | Y UTM       | Z UTM    |
|------------|---------|------------|------------|------------|--------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|-----------|------|------------|-------------|----------|
| 1523.715   | 628.607 | 47.298     | 653.382    | 652.951    | -0.189 | 0.982  | 876.474 | 1641.160 | 5125.137 | 876.507  | 1641.160 | -5125.182 | IZCR | 537770.508 | 2120014.517 | 5125.181 |
| 1491.038   | 628.992 | 46.632     | 417.980    | 417.924    | 0.434  | 0.901  | 1181.43 | 1376.491 | 5092.459 | 1181.420 | 1376.491 | 5092.447  | IZ00 | 538075.421 | 2119749.848 | 5092.459 |
| 1472.590   | 629.377 | 47.000     | 283.242    | 282.111    | 0.434  | 0.901  | 1122.54 | 1254.108 | 5074.012 | 1122.513 | 1254.104 | 5074.006  | IZ10 | 538016.514 | 2119627.461 | 5074.012 |
| 1470.212   | 628.607 | 47.815     | 273.986    | 272.585    | 0.634  | 0.773  | 1172.85 | 1210.770 | 5071.634 | 1172.803 | 1210.765 | 5071.620  | IZ20 | 538066.804 | 2119584.122 | 5071.634 |
| 1458.534   | 629.762 | 47.884     | 255.496    | 252.445    | 0.203  | 0.979  | 1051.32 | 1247.175 | 5059.956 | 1051.308 | 1247.089 | 5059.938  | IZ30 | 537945.309 | 2119620.446 | 5059.956 |
| 1461.636   | 629.762 | 48.401     | 176.363    | 172.591    | 0.229  | 0.974  | 1039.44 | 1168.024 | 5063.057 | 1039.411 | 1168.033 | 5063.058  | IZ31 | 537933.412 | 2119541.390 | 5063.057 |

Tabla 7. (Continuación) Datos de gabinete del 4 de mayo de 1998 referencia en IZAG.

| Dif en X entre Mayo y Nov | Dif en Y entre Mayo y Nov | Dif en Z entre Mayo y Nov |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0.083                     | -0.048                    | 0.090                     |
| -0.150                    | 0.145                     | 2.393                     |
| 0.083                     | 0.286                     | 0.895                     |
| -0.270                    | 0.316                     | 2.014                     |
| 1.656                     | 3.752                     | 1.171                     |
| 0.292                     | -0.315                    | 1.487                     |

Tabla 7. Datos de gabinete del 4 de mayo de 1998 referencia en IZCR.

| EST  | PV   | H corr  |          | H sexag |     |        | V sexag |          |     |     |       | H prom  | V prom  | d prom | H rad   | V rad | d Alt  |          |
|------|------|---------|----------|---------|-----|--------|---------|----------|-----|-----|-------|---------|---------|--------|---------|-------|--------|----------|
|      |      | (gonos) | (grados) | (°)     | (") | (')    | (gonos) | (grados) | (°) | (") | (')   |         |         |        |         |       |        | (angulo) |
| IZCR | IZAG | 187.889 | 170.0604 | 170     | 3   | 37.43' | -2.142  | 92.14    | 92  | 8   | 31.2  | 188.956 | 187.890 | -2.376 | 653.371 | 2.951 | -0.037 | -24.382  |
| IZCR | IZAG | 387.891 | 350.0622 | 350     | 3   | 43.92' | -2.1366 | 267.86   | 267 | 51  | 48.24 | 188.958 | 0.001   | 0.003  | 0.005   |       |        |          |
| IZCR | IZAG | 187.889 | 170.0604 | 170     | 3   | 37.43' | -2.1411 | 92.14    | 92  | 8   | 27.96 | 188.956 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZAG | 387.889 | 350.0604 | 350     | 3   | 37.44' | -2.1357 | 267.86   | 267 | 51  | 51.48 | 188.956 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZAG | 187.89  | 170.0613 | 170     | 3   | 40.68' | -2.1402 | 92.14    | 92  | 8   | 24.72 | 188.957 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZAG | 387.89  | 350.0613 | 350     | 3   | 40.67' | -2.1357 | 267.86   | 267 | 51  | 51.48 | 188.957 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ00 | 145.507 | 131.9166 | 131     | 54  | 59'    | -4.4091 | 94.41    | 94  | 24  | 32.76 | 146.574 | 145.507 | -4.897 | 404.962 | 2.286 | -0.077 | -31.119  |
| IZCR | IZ00 | 345.505 | 311.9148 | 311     | 54  | 53.28' | -4.4055 | 265.59   | 265 | 35  | 40.2  | 146.572 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ00 | 145.508 | 131.9175 | 131     | 54  | 2.99'  | -4.4073 | 94.41    | 94  | 24  | 26.28 | 146.575 | 0.001   | 0.003  | 0.001   |       |        |          |
| IZCR | IZ00 | 345.506 | 311.9157 | 311     | 54  | 56.52' | -4.4046 | 265.60   | 265 | 35  | 43.44 | 146.573 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ00 | 145.508 | 131.9175 | 131     | 54  | 2.99'  | -4.4109 | 94.41    | 94  | 24  | 39.24 | 146.575 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ00 | 345.505 | 311.9148 | 311     | 54  | 53.28' | -4.4046 | 265.60   | 265 | 35  | 43.44 | 146.572 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ10 | 163.957 | 148.5216 | 148     | 31  | 17.76' | -6.1677 | 96.17    | 96  | 10  | 3.72  | 165.024 | 163.956 | -6.852 | 461.280 | 2.575 | -0.108 | -49.552  |
| IZCR | IZ10 | 363.954 | 328.5189 | 328     | 31  | 8.03'  | -6.1641 | 263.84   | 263 | 50  | 9.24  | 165.021 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ10 | 163.957 | 148.5216 | 148     | 31  | 17.76' | -6.1695 | 96.17    | 96  | 10  | 10.2  | 165.024 | 0.001   | 0.003  | 0.001   |       |        |          |
| IZCR | IZ10 | 363.955 | 328.5198 | 328     | 31  | 11.27' | -6.1632 | 263.84   | 263 | 50  | 12.48 | 165.022 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ10 | 163.956 | 148.5207 | 148     | 31  | 14.52' | -6.1695 | 96.17    | 96  | 10  | 10.2  | 165.023 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ10 | 363.955 | 328.5198 | 328     | 31  | 11.27' | -6.165  | 263.84   | 263 | 50  | 6     | 165.022 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ20 | 161.619 | 146.4174 | 146     | 25  | 2.63'  | -5.6808 | 95.68    | 95  | 40  | 50.88 | 162.686 | 161.619 | -6.308 | 525.074 | 2.539 | -0.099 | -51.947  |
| IZCR | IZ20 | 361.62  | 326.4183 | 326     | 25  | 5.88'  | -5.6754 | 264.32   | 264 | 19  | 28.56 | 162.687 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ20 | 161.62  | 146.4183 | 146     | 25  | 5.88'  | -5.6799 | 95.68    | 95  | 40  | 47.64 | 162.687 | 0.001   | 0.003  | 0.006   |       |        |          |
| IZCR | IZ20 | 361.619 | 326.4174 | 326     | 25  | 2.63'  | -5.6745 | 264.33   | 264 | 19  | 31.8  | 162.686 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ20 | 161.62  | 146.4183 | 146     | 25  | 5.88'  | -5.6799 | 95.68    | 95  | 40  | 47.64 | 162.687 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ20 | 361.618 | 326.4165 | 326     | 25  | 59.40' | -5.6745 | 264.33   | 264 | 19  | 31.8  | 162.685 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ30 | 173.424 | 157.0419 | 157     | 2   | 30.83' | -8.3988 | 98.40    | 98  | 23  | 55.68 | 174.491 | 173.423 | -9.328 | 435.847 | 2.724 | -0.147 | -63.633  |
| IZCR | IZ30 | 373.424 | 337.0419 | 337     | 2   | 30.83' | -8.3916 | 261.61   | 261 | 36  | 30.24 | 174.491 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ30 | 173.422 | 157.0401 | 157     | 2   | 24.35' | -8.397  | 98.40    | 98  | 23  | 49.2  | 174.489 | 0.001   | 0.003  | 0.002   |       |        |          |
| IZCR | IZ30 | 373.422 | 337.0401 | 337     | 2   | 24.35' | -8.3916 | 261.61   | 261 | 36  | 30.24 | 174.489 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ30 | 173.423 | 157.041  | 157     | 2   | 27.59' | -8.3961 | 98.40    | 98  | 23  | 45.96 | 174.49  |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ30 | 373.423 | 337.041  | 337     | 2   | 27.59' | -8.3934 | 261.61   | 261 | 36  | 23.76 | 174.49  |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ31 | 178.89  | 161.9613 | 161     | 57  | 40.67' | -6.8949 | 96.89    | 96  | 53  | 41.64 | 179.957 | 178.889 | -7.659 | 504.006 | 2.810 | -0.120 | -60.495  |
| IZCR | IZ31 | 378.889 | 341.9604 | 341     | 57  | 37.43' | -6.8922 | 263.11   | 263 | 6   | 28.08 | 179.956 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ31 | 178.891 | 161.9622 | 161     | 57  | 43.91' | -6.8949 | 96.89    | 96  | 53  | 41.64 | 179.958 | 0.001   | 0.002  | 0.003   |       |        |          |
| IZCR | IZ31 | 378.887 | 341.9586 | 341     | 57  | 30.95' | -6.8913 | 263.11   | 263 | 6   | 31.32 | 179.954 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ31 | 178.889 | 161.9604 | 161     | 57  | 37.43' | -6.8949 | 96.89    | 96  | 53  | 41.64 | 179.956 |         |        |         |       |        |          |
| IZCR | IZ31 | 378.889 | 341.9604 | 341     | 57  | 37.43' | -6.8922 | 263.11   | 263 | 6   | 28.08 | 179.956 |         |        |         |       |        |          |

Tabla 7. (Continuación) Datos de gabinete del 4 de mayo de 1998 referencia en IZCR.

| Altitud PV        | mm Hg   | ppm sokkia | dist. Corr. | dist. hor. | seno   | coseno  | X                  | Y                   | Z                    | X corr   | Y corr   | Z corr   | PV   | X UTM      | Y UTM       | Z UTM    |
|-------------------|---------|------------|-------------|------------|--------|---------|--------------------|---------------------|----------------------|----------|----------|----------|------|------------|-------------|----------|
| 1499.911<br>0.089 | 625.912 | 46.276     | 653.401     | 652.939    | 0.189  | -0.982  | 999.934<br>0.0661  | 1000<br>0.0001      | 5101.333<br>-0.0894  | 1000.000 | 1000.000 | 1500.000 | IZAG | 537894.001 | 2119373.357 | 5101.422 |
| 1491.012<br>0.026 | 626.682 | 47.011     | 404.981     | 403.780    | 0.755  | -0.655  | 1181.41<br>0.012   | 1376.49<br>-0.001   | 5092.434<br>0.026    |          |          |          |      |            |             |          |
| 1472.579<br>0.011 | 627.067 | 46.345     | 461.301     | 458.626    | 0.536  | -0.844  | 1122.49<br>0.050   | 1254.101<br>0.007   | 5074.001<br>0.011    |          |          |          |      |            |             |          |
| 1470.184<br>0.029 | 625.912 | 46.276     | 525.098     | 522.516    | 0.567  | -0.824  | 1172.75<br>0.104   | 1210.761<br>0.009   | 5071.606<br>0.028    |          |          |          |      |            |             |          |
| 1458.498<br>0.037 | 626.682 | 45.977     | 435.867     | 431.1878   | 0.4054 | -0.9141 | 1051.3<br>0.0181   | 1247<br>0.17069     | 5059.92<br>0.036218  |          |          |          |      |            |             |          |
| 1461.636<br>0.000 | 626.682 | 46.494     | 504.030     | 500.379    | 0.3256 | -0.9455 | 1039.38<br>0.06224 | 1168.04<br>-0.01806 | 5063.058<br>-0.00075 |          |          |          |      |            |             |          |

Tabla 7. (Continuación) Datos de gabinete del 4 de mayo de 1998 referencia en IZCR.

| <u>Dif en X entre Mayo y Nov</u> | <u>Dif en Y entre Mayo y Nov</u> | <u>Dif en Z entre Mayo y Nov</u> |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0.000                            | 0.000                            | 0.000                            |

Tabla 8. Datos de gabinete del 29 de noviembre de 1998 referencia en IZAG.

| EST  | PV   | H corr  |          | H sexag |     |       |         | V sexag  |     |     |       |          |
|------|------|---------|----------|---------|-----|-------|---------|----------|-----|-----|-------|----------|
|      |      | (gonos) | (grados) | (°)     | (") | (')   | (gonos) | (grados) | (°) | (") | (')   | (ángulo) |
| IZAG | IZCR | 387.885 | 349.097  | 349     | 5   | 47.4  | 2.097   | 87.903   | 87  | 54  | 10.8  | 387.885  |
| IZAG | IZCR | 387.887 | 180.002  | 180     | 0   | 6.48  | 2.102   | 272.102  | 272 | 6   | 8.64  | 387.887  |
| IZAG | IZCR | 387.887 | 349.098  | 349     | 5   | 53.88 | 2.098   | 87.902   | 87  | 54  | 7.56  | 387.887  |
| IZAG | IZCR | 387.887 | 180.002  | 180     | 0   | 6.48  | 2.103   | 272.103  | 272 | 6   | 11.88 | 387.887  |
| IZAG | IZCR | 387.886 | 349.097  | 349     | 5   | 50.64 | 2.095   | 87.905   | 87  | 54  | 17.28 | 387.886  |
| IZAG | IZCR | 387.886 | 180.001  | 180     | 0   | 3.24  | 2.104   | 272.104  | 272 | 6   | 15.12 | 387.886  |
| IZAG | IZ00 | 28.612  | 25.751   | 25      | 45  | 2     | -1.263  | 91.263   | 91  | 15  | 45.72 | 28.612   |
| IZAG | IZ00 | 228.615 | 205.754  | 205     | 45  | 12.6  | -1.258  | 268.742  | 268 | 44  | 30.48 | 28.615   |
| IZAG | IZ00 | 28.615  | 25.754   | 25      | 45  | 12.6  | -1.265  | 91.265   | 91  | 15  | 55.44 | 28.615   |
| IZAG | IZ00 | 228.613 | 205.752  | 205     | 45  | 6.12  | -1.262  | 268.738  | 268 | 44  | 17.52 | 28.613   |
| IZAG | IZ10 | 28.616  | 25.754   | 25      | 45  | 15.84 | -5.185  | 264.815  | 264 | 48  | 54.36 | 28.616   |
| IZAG | IZ10 | 228.616 | 205.754  | 205     | 45  | 15.84 | -5.179  | 95.179   | 95  | 10  | 42.96 | 28.616   |
| IZAG | IZ10 | 28.616  | 25.754   | 25      | 45  | 15.84 | -5.188  | 264.812  | 264 | 48  | 44.64 | 28.616   |
| IZAG | IZ10 | 228.613 | 205.752  | 205     | 45  | 6.12  | -5.177  | 264.823  | 264 | 49  | 23.52 | 28.613   |
| IZAG | IZ20 | 43.824  | 39.442   | 39      | 26  | 29.76 | -6.188  | 263.813  | 263 | 48  | 45    | 43.824   |
| IZAG | IZ20 | 243.824 | 219.442  | 219     | 26  | 29.76 | -6.179  | 263.821  | 263 | 49  | 14.16 | 43.824   |
| IZAG | IZ20 | 43.824  | 39.442   | 39      | 26  | 29.76 | -6.188  | 96.188   | 96  | 11  | 15    | 43.824   |
| IZAG | IZ20 | 243.825 | 219.443  | 219     | 26  | 33    | -6.179  | 263.822  | 263 | 49  | 17.4  | 43.825   |
| IZAG | IZ30 | 12.812  | 11.531   | 11      | 31  | 50.88 | -9.233  | 99.233   | 99  | 13  | 59.16 | 12.812   |
| IZAG | IZ30 | 212.813 | 191.532  | 191     | 31  | 54.12 | -9.227  | 99.227   | 99  | 13  | 36.48 | 12.813   |
| IZAG | IZ30 | 12.813  | 11.532   | 11      | 31  | 54.12 | -9.236  | 260.764  | 260 | 45  | 51.12 | 12.813   |
| IZAG | IZ30 | 212.814 | 191.533  | 191     | 31  | 57.36 | -9.232  | 99.232   | 99  | 13  | 55.92 | 12.814   |
| IZAG | IZ31 | 14.564  | 13.108   | 13      | 6   | 27.36 | -11.959 | 101.959  | 101 | 57  | 33.12 | 14.564   |
| IZAG | IZ31 | 214.561 | 193.105  | 193     | 6   | 17.64 | -11.956 | 258.044  | 258 | 2   | 39.84 | 14.561   |
| IZAG | IZ31 | 14.562  | 13.106   | 13      | 6   | 20.88 | -11.961 | 258.039  | 258 | 2   | 20.4  | 14.562   |
| IZAG | IZ31 | 214.563 | 193.107  | 193     | 6   | 24.12 | -11.955 | 258.045  | 258 | 2   | 43.08 | 14.563   |
| IZAG | IA30 | 12.866  | 11.579   | 11      | 34  | 45.84 | -8.812  | 261.188  | 261 | 11  | 17.16 | 12.866   |
| IZAG | IA30 | 212.863 | 191.577  | 191     | 34  | 36.12 | -8.804  | 98.804   | 98  | 48  | 13.68 | 12.863   |
| IZAG | IA30 | 12.864  | 11.578   | 11      | 34  | 39.36 | -8.807  | 261.194  | 261 | 11  | 36.6  | 12.864   |
| IZAG | IA30 | 212.863 | 191.577  | 191     | 34  | 36.12 | -8.801  | 98.801   | 98  | 48  | 3.96  | 12.863   |



Tabla 8. (Continuación) Datos de gabinete del 29 de noviembre de 1998 referencia en IZAG.

| H prom  | V prom  | d prom  | H rad | V rad  | d Alt   | Altitud PV | mm Hg   | ppm sokkia | dist. corr. | dist. hor. | seno   | coseno |
|---------|---------|---------|-------|--------|---------|------------|---------|------------|-------------|------------|--------|--------|
| 387.886 | 2.333   | 653.370 | 6.093 | 0.037  | 23.944  | 1523.558   | 454.229 | 108.153    | 653.441     | 653.009    | -0.189 | 0.982  |
| 109.545 | 0.004   | 0.000   |       |        |         |            |         |            |             |            |        |        |
| 28.614  | -1.402  | 417.897 | 0.449 | -0.022 | -9.205  | 1488.645   | 454.229 | 108.153    | 417.942     | 417.836    | 0.434  | 0.901  |
| 115.470 | 0.003   | 0.002   |       |        |         |            |         |            |             |            |        |        |
| 28.615  | -5.758  | 282.908 | 0.449 | -0.090 | -25.555 | 1471.695   | 454.229 | 107.120    | 282.938     | 281.763    | 0.435  | 0.901  |
| 115.469 | 0.006   | 0.001   |       |        |         |            |         |            |             |            |        |        |
| 43.824  | -6.870  | 274.107 | 0.688 | -0.108 | -29.527 | 1468.198   | 454.229 | 107.120    | 274.136     | 272.519    | 0.635  | 0.772  |
| 115.470 | 0.005   | 0.001   |       |        |         |            |         |            |             |            |        |        |
| 12.813  | -10.258 | 251.554 | 0.201 | -0.161 | -40.362 | 1457.363   | 454.229 | 107.120    | 251.581     | 248.287    | 0.200  | 0.980  |
| 115.471 | 0.004   | 0.010   |       |        |         |            |         |            |             |            |        |        |
| 14.563  | -13.286 | 176.518 | 0.229 | -0.209 | -36.576 | 1460.149   | 454.229 | 107.120    | 176.537     | 172.652    | 0.227  | 0.974  |
| 115.469 | 0.003   | 0.002   |       |        |         |            |         |            |             |            |        |        |
| 12.864  | -9.784  | 255.274 | 0.202 | -0.154 | -39.083 | 1458.642   | 454.229 | 106.086    | 255.301     | 252.258    | 0.201  | 0.980  |
| 115.469 | 0.005   | 0.004   |       |        |         |            |         |            |             |            |        |        |

Tabla 8. (Continuación) Datos de gabinete del 29 de noviembre de 1998 referencia en IZAG.

| X        | Y        | Z        | X corr   | Y corr   | Z corr   | PV   | X UTM       | Y UTM       | Z UTM    |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|-------------|-------------|----------|
| 876.493  | 1641.223 | 5124.980 | 876.424  | 1641.209 | 5125.091 | IZCR | 537770.4253 | 2120014.566 | 5125.091 |
| 1181.543 | 1376.337 | 5090.067 | 1181.571 | 1376.346 | 5090.011 | IZ00 | 538075.5716 | 2119749.703 | 5090.067 |
| 1122.427 | 1253.776 | 5073.117 | 1122.430 | 1253.819 | 5073.078 | IZ10 | 538016.4311 | 2119627.176 | 5073.117 |
| 1173.130 | 1210.458 | 5069.620 | 1173.072 | 1210.449 | 5069.575 | IZ20 | 538067.0735 | 2119583.806 | 5069.620 |
| 1049.635 | 1243.275 | 5058.785 | 1049.652 | 1243.337 | 5058.771 | IZ30 | 537943.6533 | 2119616.694 | 5058.785 |
| 1039.150 | 1168.155 | 5061.571 | 1039.119 | 1168.348 | 5061.504 | IZ31 | 537933.1199 | 2119541.705 | 5061.570 |
| 1050.627 | 1247.125 | 5060.064 | 1050.627 | 1247.125 | 5060.064 | IA30 | 537944.6279 | 2119620.482 | 5060.064 |

Tabla 8. Datos de gabinete del 29 de noviembre de 1998 referencia en IZCR.

| EST  | PV   | H corr  |          | H sexag |     |       | V sexag |          |     |     |       |          |
|------|------|---------|----------|---------|-----|-------|---------|----------|-----|-----|-------|----------|
|      |      | (gonos) | (grados) | (°)     | (") | (')   | (gonos) | (grados) | (°) | (") | (')   | (ángulo) |
| IZCR | IZAG | 187.885 | 169.097  | 169     | 5   | 47.4  | -2.137  | 92.137   | 92  | 8   | 11.76 | 187.884  |
| IZCR | IZAG | 387.884 | 349.096  | 349     | 5   | 44.16 | -2.138  | 267.862  | 267 | 51  | 41.76 | 187.884  |
| IZCR | IZAG | 187.885 | 169.097  | 169     | 5   | 47.4  | -2.136  | 92.136   | 92  | 8   | 8.52  | 187.883  |
| IZCR | IZAG | 387.883 | 349.095  | 349     | 5   | 40.92 | -2.137  | 267.863  | 267 | 51  | 48.24 | 187.886  |
| IZCR | IZAG | 187.886 | 169.097  | 169     | 5   | 50.64 | -2.138  | 92.138   | 92  | 8   | 15    | 187.884  |
| IZCR | IZAG | 387.884 | 349.096  | 349     | 5   | 44.16 | -2.139  | 267.861  | 267 | 51  | 38.52 | 187.884  |
| IZCR | IZ00 | 145.514 | 130.963  | 130     | 57  | 45.36 | -4.738  | 94.738   | 94  | 44  | 15.36 | 145.514  |
| IZCR | IZ00 | 345.513 | 310.962  | 310     | 57  | 42.12 | -4.729  | 265.271  | 265 | 16  | 17.04 | 145.513  |
| IZCR | IZ00 | 145.514 | 130.963  | 130     | 57  | 45.36 | -4.738  | 94.738   | 94  | 44  | 15.36 | 145.514  |
| IZCR | IZ00 | 345.512 | 310.961  | 310     | 57  | 38.88 | -4.729  | 265.271  | 265 | 16  | 17.04 | 145.512  |
| IZCR | IZ10 | 163.987 | 147.588  | 147     | 35  | 17.88 | -6.197  | 96.197   | 96  | 11  | 50.64 | 163.987  |
| IZCR | IZ10 | 363.987 | 327.588  | 327     | 35  | 17.88 | -6.188  | 263.813  | 263 | 48  | 45    | 163.987  |
| IZCR | IZ10 | 163.986 | 147.587  | 147     | 35  | 14.64 | -6.196  | 96.196   | 96  | 11  | 44.16 | 163.986  |
| IZCR | IZ10 | 363.987 | 327.588  | 327     | 35  | 17.88 | -6.187  | 263.813  | 263 | 48  | 48.24 | 163.987  |
| IZCR | IZ20 | 161.622 | 145.460  | 145     | 27  | 35.28 | -5.874  | 95.874   | 95  | 52  | 27.48 | 161.622  |
| IZCR | IZ20 | 361.621 | 325.459  | 325     | 27  | 32.04 | -5.864  | 264.136  | 264 | 8   | 8.16  | 161.621  |
| IZCR | IZ20 | 161.62  | 145.458  | 145     | 27  | 28.8  | -5.874  | 95.874   | 95  | 52  | 27.48 | 161.62   |
| IZCR | IZ20 | 361.622 | 325.460  | 325     | 27  | 35.28 | -5.865  | 264.135  | 264 | 8   | 4.92  | 161.622  |
| IZCR | IZ30 | 173.864 | 156.478  | 156     | 28  | 39.36 | -8.466  | 98.466   | 98  | 27  | 58.68 | 173.864  |
| IZCR | IZ30 | 373.863 | 336.477  | 336     | 28  | 36.12 | -8.455  | 261.545  | 261 | 32  | 43.44 | 173.863  |
| IZCR | IZ30 | 173.862 | 156.476  | 156     | 28  | 32.88 | -8.464  | 98.464   | 98  | 27  | 48.96 | 173.862  |
| IZCR | IZ30 | 373.86  | 336.474  | 336     | 28  | 26.4  | -8.456  | 261.545  | 261 | 32  | 40.2  | 173.86   |
| IZCR | IZ31 | 178.91  | 161.019  | 161     | 1   | 8.4   | -6.946  | 96.946   | 96  | 56  | 46.32 | 178.91   |
| IZCR | IZ31 | 378.906 | 341.015  | 341     | 0   | 55.44 | -6.937  | 263.063  | 263 | 3   | 46.08 | 178.906  |
| IZCR | IZ31 | 178.909 | 161.018  | 161     | 1   | 5.16  | -6.946  | 96.946   | 96  | 56  | 46.32 | 178.909  |
| IZCR | IZ31 | 378.909 | 341.018  | 341     | 1   | 5.16  | -6.935  | 263.065  | 263 | 3   | 52.56 | 178.909  |

Tabla 8. (Continuación) Datos de gabinete del 29 de noviembre de 1998 referencia en IZCR.

| H prom  | V prom | d prom  | H rad | V rad  | d Alt   | Altitud PV | mm Hg   | ppm sokkia | dist.corr. | dist. hor. | seno  | coseno |
|---------|--------|---------|-------|--------|---------|------------|---------|------------|------------|------------|-------|--------|
| 187.885 | -2.375 | 653.374 | 2.951 | -0.037 | -24.370 | 1499.779   | 446.530 | 109.069    | 653.446    | 652.984    | 0.189 | -0.982 |
| 109.544 | 0.001  | 0.001   |       |        |         | 0.221      |         |            |            |            |       |        |
| 145.513 | -5.259 | 405.390 | 2.286 | -0.083 | -33.454 | 1488.420   | 446.530 | 109.069    | 405.434    | 404.035    | 0.755 | -0.656 |
| 115.471 | 0.006  | 0.000   |       |        |         | 0.225      |         |            |            |            |       |        |
| 163.987 | -6.880 | 461.505 | 2.576 | -0.108 | -49.782 | 1471.617   | 446.530 | 109.069    | 461.555    | 458.841    | 0.536 | -0.844 |
| 115.470 | 0.006  | 0.002   |       |        |         | 0.078      |         |            |            |            |       |        |
| 161.621 | -6.522 | 525.691 | 2.539 | -0.102 | -53.765 | 1468.109   | 446.530 | 109.069    | 525.748    | 522.971    | 0.567 | -0.824 |
| 115.470 | 0.006  | 0.001   |       |        |         | 0.090      |         |            |            |            |       |        |
| 173.862 | -9.400 | 438.638 | 2.731 | -0.148 | -64.539 | 1457.335   | 446.530 | 109.069    | 438.686    | 433.881    | 0.399 | -0.917 |
| 115.471 | 0.006  | 0.013   |       |        |         | 0.028      |         |            |            |            |       |        |
| 178.909 | -7.713 | 503.526 | 2.810 | -0.121 | -60.859 | 1460.015   | 446.530 | 109.069    | 503.581    | 499.864    | 0.325 | -0.946 |
| 115.471 | 0.006  | 0.000   |       |        |         | 0.133      |         |            |            |            |       |        |

Tabla 8. (Continuación) Datos de gabinete del 29 de noviembre de 1998 referencia en IZCR.

| X                  | Y                  | Z                  | X corr | Y corr | Z corr | PV   | X UTM      | Y UTM       | Z UTM    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------|--------|--------|------|------------|-------------|----------|
| 1000.014<br>-0.014 | 1000.028<br>-0.028 | 5101.201<br>-0.221 | 1000   | 1000   | 1500   | IZAG | 537894.001 | 2119373.357 | 5101.422 |
| 1181.599<br>-0.056 | 1376.355<br>-0.018 | 5089.842<br>0.113  |        |        |        |      |            |             |          |
| 1122.433<br>-0.006 | 1253.862<br>-0.086 | 5073.039<br>0.078  |        |        |        |      |            |             |          |
| 1173.015<br>0.115  | 1210.440<br>0.019  | 5069.531<br>0.090  |        |        |        |      |            |             |          |
| 1049.670<br>-0.035 | 1243.400<br>-0.125 | 5058.757<br>0.028  |        |        |        |      |            |             |          |
| 1039.088<br>0.063  | 1168.542<br>-0.387 | 5061.437<br>0.133  |        |        |        |      |            |             |          |

### ***APÉNDICE III***

Tablas de datos de medición que registran el movimiento de las estacas ubicadas en el glaciar de Ayoloco y Sudoriental en el volcán Iztaccíhuatl.

Tabla 9. Medición de Estacas en el Volcán Iztaccihuatl.

| Estación<br>Fecha | P.V. | Distancia Horizontal |          | X        |          | Y        |          | Z        |          | Observaciones |
|-------------------|------|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------|
|                   |      | 4-5-98               | 29-11-98 | 4-5-98   | 29-11-98 | 4-5-98   | 29-11-98 | 4-5-98   | 29-11-98 |               |
| IZAG              | IZCR | 652.951              | 653.009  | 876.507  | 876.424  | 1641.160 | 1641.209 | 5125.182 | 5125.091 |               |
|                   | IZ00 | 417.924              | 417.836  | 1181.420 | 1181.571 | 1376.491 | 1376.346 | 5092.447 | 5090.011 |               |
|                   | IZ10 | 282.111              | 281.763  | 1122.513 | 1122.430 | 1254.104 | 1253.819 | 5074.006 | 5073.078 |               |
|                   | IZ20 | 272.585              | 272.519  | 1172.803 | 1173.072 | 1210.765 | 1210.449 | 5071.620 | 5069.575 |               |
|                   | IZ30 | 252.445              | 248.287  | 1051.308 | 1049.652 | 1247.089 | 1243.337 | 5059.938 | 5058.771 |               |
|                   | IZ31 | 172.591              | 172.652  | 1039.411 | 1039.119 | 1168.033 | 1168.348 | 5063.058 | 5061.504 |               |
|                   | IA30 | 0                    | 252.258  | 0        | 1050.627 | 0        | 1247.125 | 0        | 5060.064 |               |
| IZCR              | IZAG | 652.939              | 652.984  | 1000     | 1000     | 1000     | 1000     | 5101.422 | 5101.422 |               |

| Coordenadas |      | X UTM       |            | Y UTM       |            | Z UTM    |          |
|-------------|------|-------------|------------|-------------|------------|----------|----------|
| Fecha       |      | 4-5-98      | 29-11-98   | 4-5-98      | 29-11-98   | 4-5-98   | 29-11-98 |
| IZAG        | IZCR | 537770.5081 | 537770.425 | 2120014.517 | 2120014.57 | 5125.181 | 5125.091 |
|             | IZ00 | 538075.4215 | 538075.572 | 2119749.848 | 2119749.70 | 5092.459 | 5090.067 |
|             | IZ10 | 538016.5137 | 538016.431 | 2119627.461 | 2119627.18 | 5074.012 | 5073.117 |
|             | IZ20 | 538066.8036 | 538067.073 | 2119584.122 | 2119583.81 | 5071.634 | 5069.620 |
|             | IZ30 | 537945.3089 | 537943.653 | 2119620.446 | 2119616.69 | 5059.956 | 5058.785 |
|             | IZ31 | 537933.4115 | 537933.12  | 2119541.390 | 2119541.71 | 5063.057 | 5061.570 |
|             | IA30 | 0           | 537944.628 | 0           | 2119620.48 | 0        | 5060.064 |
| IZCR        | IZAG | 537894.001  | 537894.001 | 2119373.357 | 2119373.36 | 5101.422 | 5101.422 |

Tabla 10. Movimiento de Estacas en el Volcán Iztaccihuatl.

| Fecha<br>Estaca     | 4-05-98 / 29-11-98 |        |       |        |       |        |      |
|---------------------|--------------------|--------|-------|--------|-------|--------|------|
|                     | IZCR               | IZ00   | IZ10  | IZ20   | IZ30  | IZ31   | IZAG |
| Tiempo (días)       | 209                | 209    | 209   | 209    | 209   | 209    | 209  |
| Dif. X (m)          | 0                  | -0.150 | 0.083 | -0.270 | 1.656 | 0.292  | 0    |
| Dif. Y (m)          | 0                  | 0.145  | 0.286 | 0.316  | 3.752 | -0.315 | 0    |
| Dif. Z (m)          | 0                  | 2.393  | 0.895 | 2.014  | 1.171 | 1.487  | 0    |
| Error (m ±)         | 0                  | 0.481  | 0.860 | 0.700  | 0.537 | 0.621  | 0    |
| Comp. Mov. Abs. (m) | 0                  | 0.109  | 0.299 | 0.245  | 4.046 | 0.231  | 0    |
| Tasa de Mov. (m/d)  | 0                  | 0.001  | 0.001 | 0.001  | 0.019 | 0.001  | 0    |

## ***APÉNDICE IV***

Resumen de datos del cálculo de las componentes y tasas de movimiento de las estacas en los glaciares de Ayoloco y Sudoriental en el volcán Iztaccíhuatl del 4 de mayo al 29 de noviembre de 1998.



Tabla 11. Movimiento de Estacas en el Volcán Iztaccihuatl.

| Estación |                    | IZCR   |   |   |   |                  |           |              |
|----------|--------------------|--------|---|---|---|------------------|-----------|--------------|
|          | Fecha              | Tiempo | X | Y | Z | Comp.Mov.Abs.(m) | Error (m) | Tasa de Mov. |
| 1        | 4-05-98 / 29-11-98 | 209    | 0 | 0 | 0 | 0                | 0         | 0            |

| PV |                    | IZ00   |        |       |       |                  |           |              |
|----|--------------------|--------|--------|-------|-------|------------------|-----------|--------------|
|    | Fecha              | Tiempo | X      | Y     | Z     | Comp.Mov.Abs.(m) | Error (m) | Tasa de Mov. |
| 2  | 4-05-98 / 29-11-98 | 209    | -0.150 | 0.145 | 2.393 | 0.109            | 0.481     | 0.0005       |

| PV |                    | IZ10   |       |       |       |                  |           |              |
|----|--------------------|--------|-------|-------|-------|------------------|-----------|--------------|
|    | Fecha              | Tiempo | X     | Y     | Z     | Comp.Mov.Abs.(m) | Error (m) | Tasa de Mov. |
| 3  | 4-05-98 / 29-11-98 | 209    | 0.083 | 0.286 | 0.895 | 0.299            | 0.860     | 0.0014       |

| PV |                    | IZ20   |        |       |       |                  |           |              |
|----|--------------------|--------|--------|-------|-------|------------------|-----------|--------------|
|    | Fecha              | Tiempo | X      | Y     | Z     | Comp.Mov.Abs.(m) | Error (m) | Tasa de Mov. |
| 4  | 4-05-98 / 29-11-98 | 209    | -0.270 | 0.316 | 2.014 | 0.245            | 0.700     | 0.0012       |

| PV |                    | IZ30   |       |       |       |                  |           |              |
|----|--------------------|--------|-------|-------|-------|------------------|-----------|--------------|
|    | Fecha              | Tiempo | X     | Y     | Z     | Comp.Mov.Abs.(m) | Error (m) | Tasa de Mov. |
| 5  | 4-05-98 / 29-11-98 | 209    | 1.656 | 3.752 | 1.171 | 4.046            | 0.537     | 0.0194       |

| PV |                    | IZ31   |        |        |       |                  |           |              |
|----|--------------------|--------|--------|--------|-------|------------------|-----------|--------------|
|    | Fecha              | Tiempo | X      | Y      | Z     | Comp.Mov.Abs.(m) | Error (m) | Tasa de Mov. |
| 6  | 4-05-98 / 29-11-98 | 209    | 0.2916 | -0.315 | 1.487 | 0.231            | 0.621     | 0.0011       |

| Estación |                    | IZAG   |   |   |   |                  |           |              |
|----------|--------------------|--------|---|---|---|------------------|-----------|--------------|
|          | Fecha              | Tiempo | X | Y | Z | Comp.Mov.Abs.(m) | Error (m) | Tasa de Mov. |
| 7        | 4-05-98 / 29-11-98 | 209    | 0 | 0 | 0 | 0                | 0         | 0            |

## **APÉNDICE V**

Datos de estimación del error analítico con referencia en la estación IZAG (Peña Aguilera) y transformación de ángulos en gones (centesimales) a ángulos en grados (sexagesimales) y a distancias del 4 de mayo al 29 de noviembre de 1998.

Tabla 12. Estimación del error analítico (desde estación IZAG).

**1) Ángulos en gones.**

| <i>P.V. / Fecha</i> | <i>Error en distancia (m)</i> |                  | <i>Error en ángulo vertical</i> |                  | <i>Error en ángulo horizontal</i> |                  |
|---------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------|
|                     | <i>Mayo</i>                   | <i>Noviembre</i> | <i>Mayo</i>                     | <i>Noviembre</i> | <i>Mayo</i>                       | <i>Noviembre</i> |
| IZ00                | 0.0003                        | 0.0012           | 0.0004                          | 0.0017           | 0.0006                            | 0.0008           |
| IZ10                | 0.0012                        | 0.0006           | 0.0015                          | 0.0028           | 0.0006                            | 0.0008           |
| IZ20                | 0.0086                        | 0.0006           | 0.0009                          | 0.0028           | 0.0004                            | 0.0003           |
| IZ30                | 0.0022                        | 0.0052           | 0.0007                          | 0.0021           | 0.0005                            | 0.0004           |
| IZ31                | 0.0025                        | 0.0012           | 0.0014                          | 0.0017           | 0.0005                            | 0.0006           |

**2) Ángulos en grados.**

| <i>P.V. / Fecha</i> | <i>Error en distancia (m)</i> |                  | <i>Error en ángulo vertical</i> |                  | <i>Error en ángulo horizontal</i> |                  |
|---------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------|
|                     | <i>Mayo</i>                   | <i>Noviembre</i> | <i>Mayo</i>                     | <i>Noviembre</i> | <i>Mayo</i>                       | <i>Noviembre</i> |
| IZ00                | 0.0003                        | 0.0012           | 0.0004                          | 0.0015           | 0.0006                            | 0.0007           |
| IZ10                | 0.0012                        | 0.0006           | 0.0014                          | 0.0026           | 0.0005                            | 0.0007           |
| IZ20                | 0.0086                        | 0.0006           | 0.0008                          | 0.0025           | 0.0004                            | 0.0002           |
| IZ30                | 0.0022                        | 0.0052           | 0.0006                          | 0.0019           | 0.0005                            | 0.0004           |
| IZ31                | 0.0025                        | 0.0012           | 0.0013                          | 0.0015           | 0.0005                            | 0.0006           |

**3) Transformación de ángulos a distancias.**

| <i>P.V. / Fecha</i> | <i>Error en distancia (m)</i> |                  | <i>Error en ángulo vertical (m)</i> |                  | <i>Error en ángulo horizontal (m)</i> |                  |
|---------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|---------------------------------------|------------------|
|                     | <i>Mayo</i>                   | <i>Noviembre</i> | <i>Mayo</i>                         | <i>Noviembre</i> | <i>Mayo</i>                           | <i>Noviembre</i> |
| IZ00                | 0.0003                        | 0.0012           | 0.1586                              | 0.6205           | 0.2312                                | 0.2820           |
| IZ10                | 0.0012                        | 0.0006           | 0.5717                              | 1.0680           | 0.2260                                | 0.2820           |
| IZ20                | 0.0086                        | 0.0006           | 0.3281                              | 1.0341           | 0.1505                                | 0.0940           |
| IZ30                | 0.0022                        | 0.0052           | 0.2689                              | 0.7897           | 0.2041                                | 0.1535           |
| IZ31                | 0.0025                        | 0.0012           | 0.5379                              | 0.6205           | 0.2041                                | 0.2427           |

## ***APÉNDICE VI***

Datos del cálculo de errores de medición en distancias, ángulo vertical, ángulo horizontal, error total y la estimación de precisión a priori con referencia en la estación IZAG (Peña Aguilera) para el 4 de mayo y 29 de noviembre de 1998.

Tabla 13. Datos del calculo de los errores.

A) Calculo de errores de medición desde la estación IZAG

| P.V. / Fecha | Distancia (m) |           | Error en distancia (m) |           | Error en ángulo vertical (m) |           | Error en ángulo horizontal (m) |           | Error total (m) |           |
|--------------|---------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|-----------------|-----------|
|              | Mayo          | Noviembre | Mayo                   | Noviembre | Mayo                         | Noviembre | Mayo                           | Noviembre | Mayo            | Noviembre |
| IZ00         | 417.924       | 417.836   | 0.0003                 | 0.0012    | 0.1586                       | 0.6205    | 0.2312                         | 0.2820    | 0.2804          | 0.6816    |
| IZ10         | 282.111       | 281.763   | 0.0012                 | 0.0006    | 0.5717                       | 1.0680    | 0.2260                         | 0.2820    | 0.6148          | 1.1046    |
| IZ20         | 272.585       | 272.519   | 0.0086                 | 0.0006    | 0.3281                       | 1.0341    | 0.1505                         | 0.0940    | 0.3611          | 1.0384    |
| IZ30         | 252.445       | 248.287   | 0.0022                 | 0.0052    | 0.2689                       | 0.7897    | 0.0000                         | 0.1535    | 0.2689          | 0.8045    |
| IZ31         | 172.591       | 172.652   | 0.0025                 | 0.0012    | 0.5379                       | 0.6205    | 0.2041                         | 0.2427    | 0.5753          | 0.6663    |

B) Estimación de precisión a priori desde la estación IZAG

| P.V. / Fecha | Distancia (m) |           | Error a priori (m) |           |
|--------------|---------------|-----------|--------------------|-----------|
|              | Mayo          | Noviembre | Mayo               | Noviembre |
| IZ00         | 417.924       | 417.836   | 0.005              | 0.005     |
| IZ10         | 282.110       | 281.763   | 0.005              | 0.005     |
| IZ20         | 272.585       | 272.519   | 0.005              | 0.005     |
| IZ30         | 252.445       | 248.287   | 0.005              | 0.005     |
| IZ31         | 172.590       | 172.652   | 0.005              | 0.005     |

## ***APÉNDICE VII***

Resumen de resultados obtenidos del cálculo de datos de campo y gabinete, comparación de la diferencia de distancias y altitud con respecto al error analítico e interpretación en base a los datos y gráficas.

Tabla 14 . Resumen de resultados (desde estación IZAG).

| Estaca/Fecha | Distancia (m)   |                 | Diferencia<br>(m) | Comparación de la diferencia de distancias<br>respecto al error analítico | Observaciones            |
|--------------|-----------------|-----------------|-------------------|---|--------------------------|
|              | Mayo            | Noviembre       |                   |   |                          |
| IZ00         | 417.924 ± 0.280 | 417.836 ± 0.682 | 0.088             | < al error analítico  | No se mueve              |
| IZ10         | 282.110 ± 0.615 | 281.763 ± 1.105 | 0.347             | < al error analítico  | No se mueve              |
| IZ20         | 272.585 ± 0.361 | 272.519 ± 1.038 | 0.066             | < al error analítico  | No se mueve              |
| IZ30         | 252.445 ± 0.269 | 248.286 ± 0.805 | 4.159             | > al error analítico  | Movimiento significativo |
| IZ31         | 172.590 ± 0.575 | 172.652 ± 0.666 | 0.061             | < al error analítico  | No se mueve              |

| Estaca/Fecha | Altitud (m)     |                 | Diferencia<br>(m) | Comparación de la diferencia de altitud<br>respecto al error analítico | Observaciones             |
|--------------|-----------------|-----------------|-------------------|--|---------------------------|
|              | Mayo            | Noviembre       |                   |  |                           |
| IZ00         | 5092.5 ± 0.1586 | 5090.1 ± 0.6205 | 2.393             | > al error analítico   | Disminución significativa |
| IZ10         | 5074.0 ± 0.5717 | 5073.1 ± 1.0680 | 0.895             | < al error analítico   | No disminuye              |
| IZ20         | 5071.6 ± 0.3281 | 5069.6 ± 1.0341 | 2.014             | > al error analítico   | Disminución significativa |
| IZ30         | 5060.0 ± 0.2689 | 5058.8 ± 0.7897 | 1.171             | > al error analítico   | Disminución significativa |
| IZ31         | 5063.1 ± 0.5379 | 5061.6 ± 0.6205 | 1.487             | > al error analítico   | Disminución significativa |

Figura 47. Gráficas Distancia contra Tiempo Referencia en IZAG

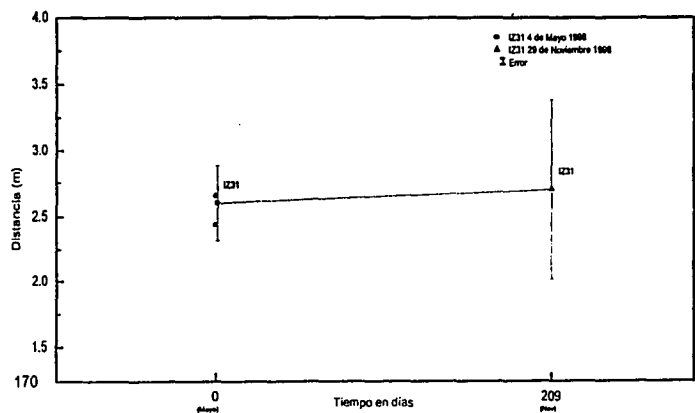
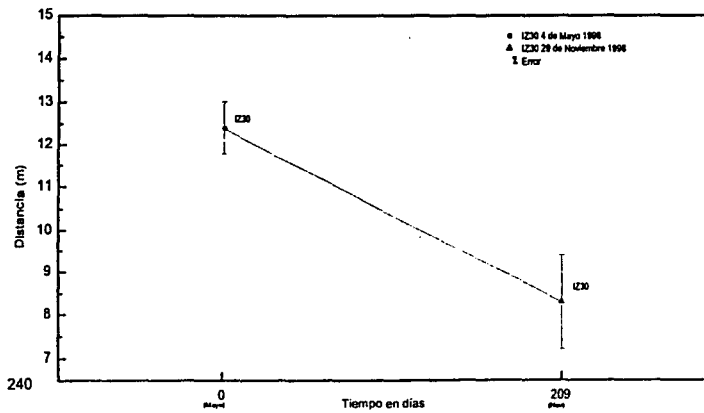
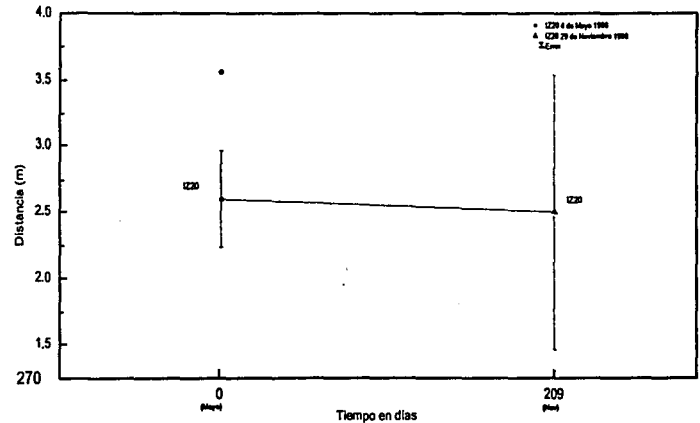
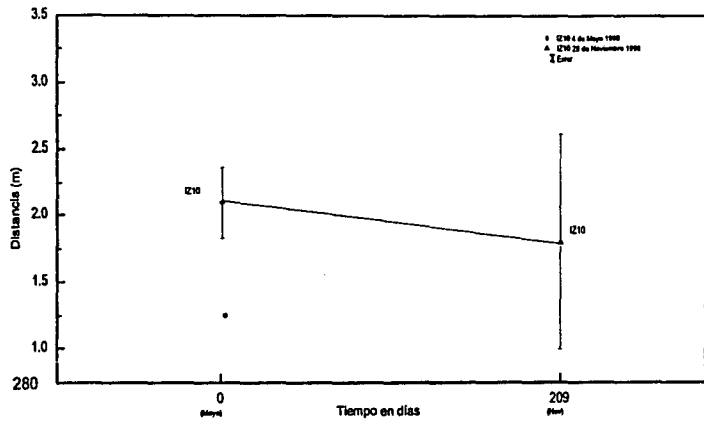
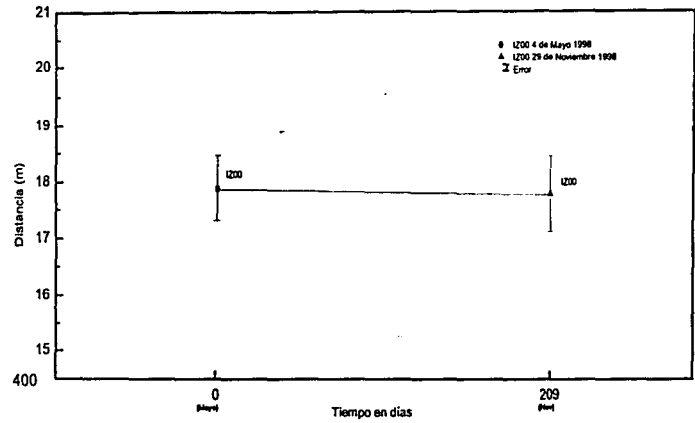
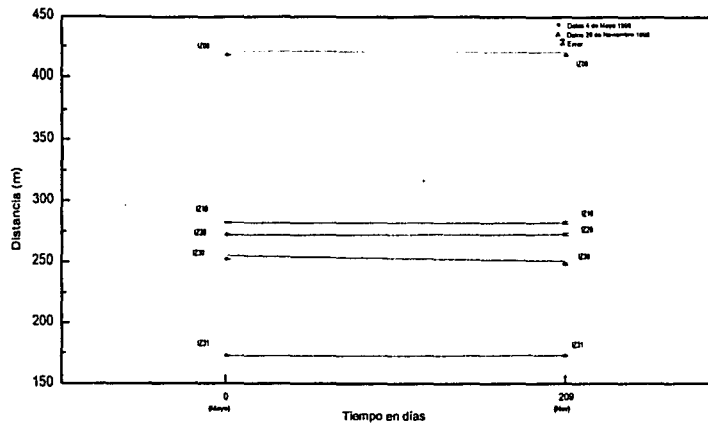
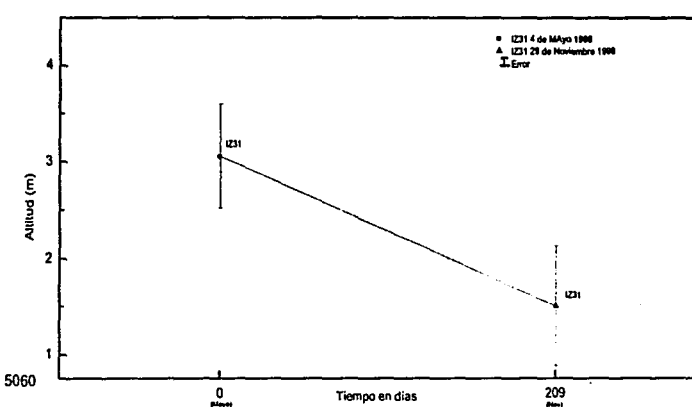
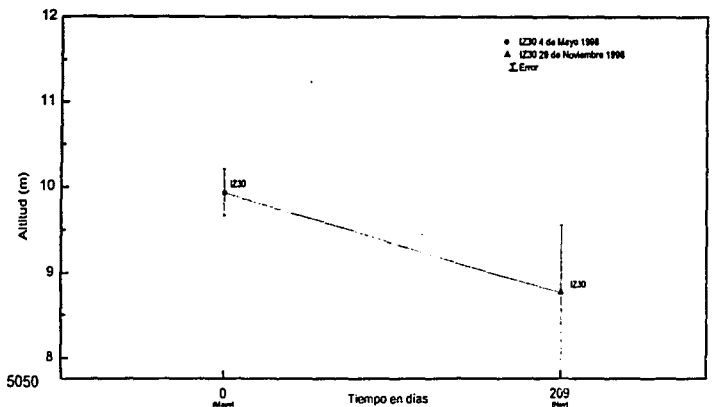
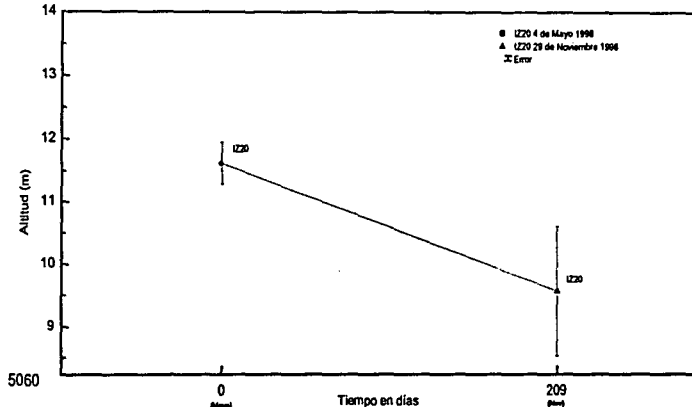
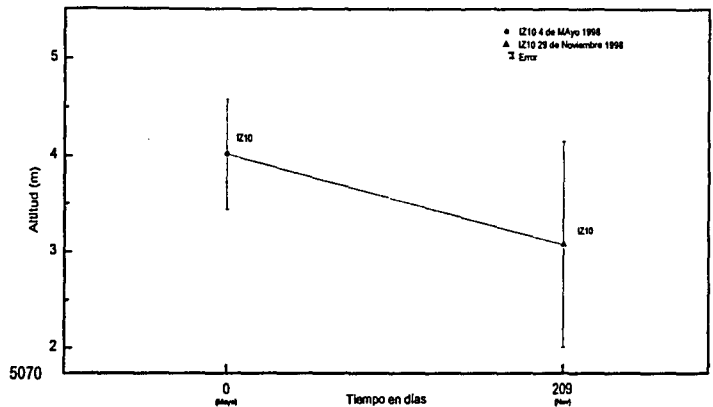
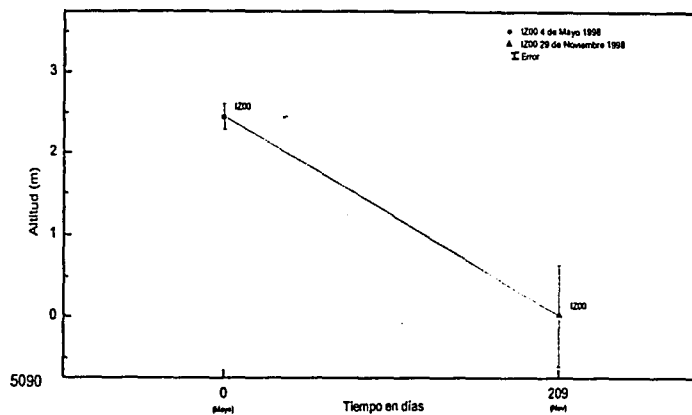
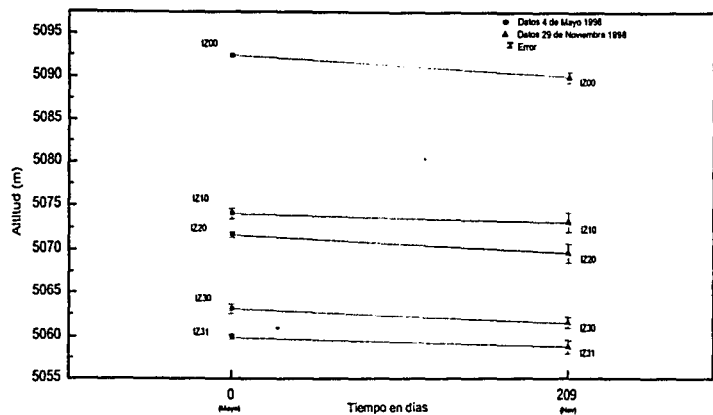




Figura 48. Gráficas Altitud contra Tiempo Referencia en IZAG



## **APÉNDICE VIII**

Modelos digitales de elevación donde se observa la delimitación de los glaciares, ubicación de las estaciones y estacas vistas desde diferentes perspectivas en el volcán Iztaccíhuatl.

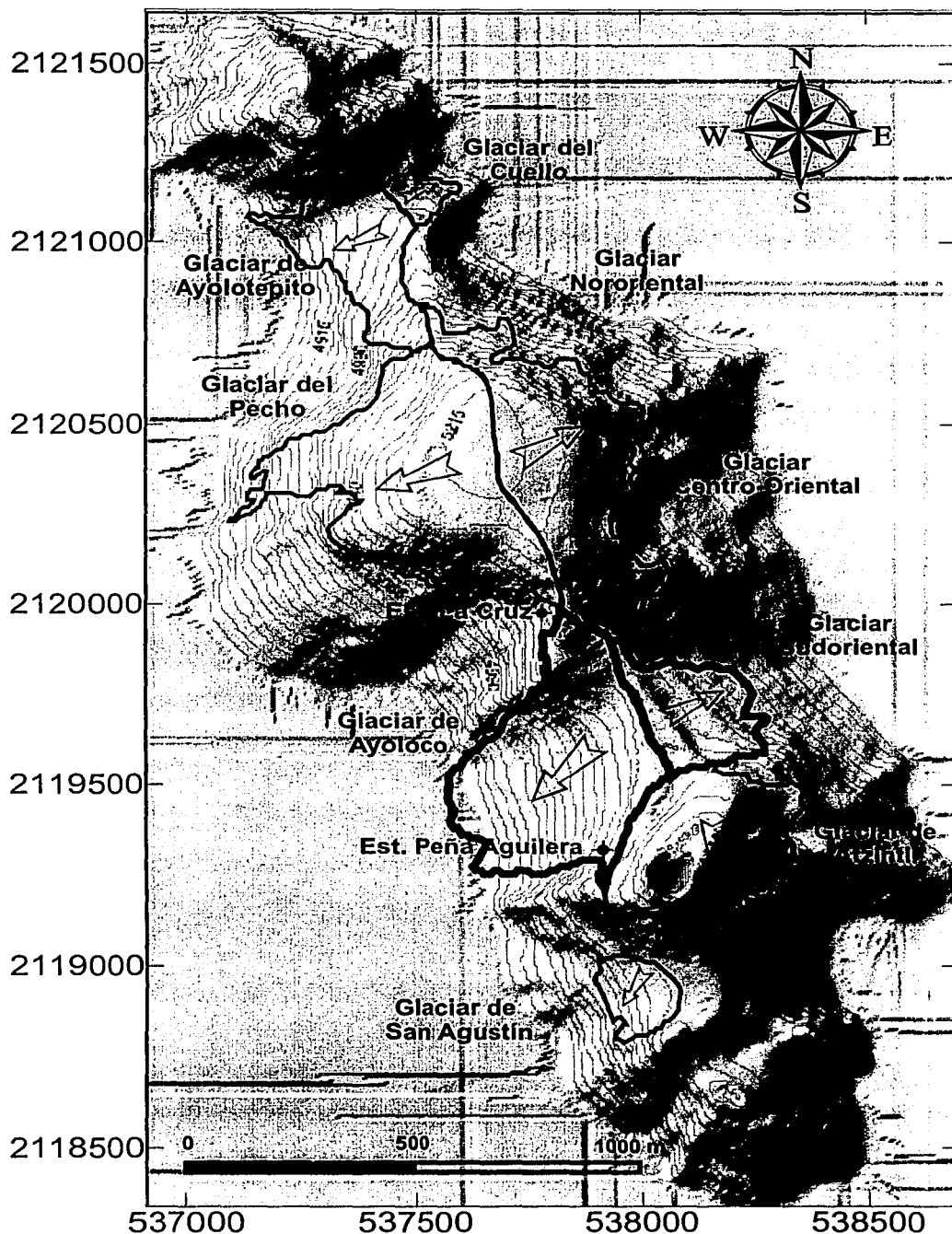
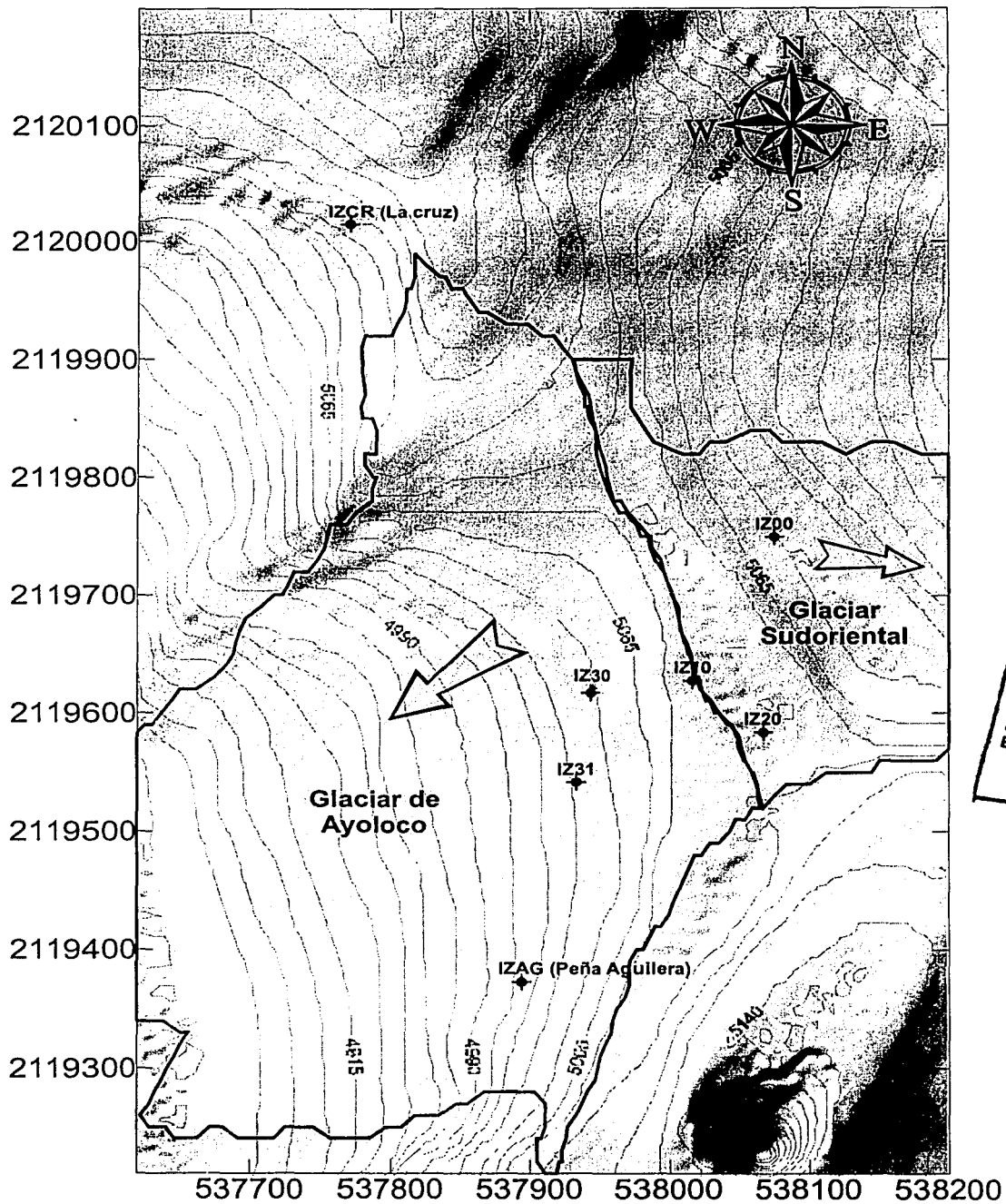


Figura 48. Modelo digital de elevación del volcán Iztaccíhuatl en donde se observa la delimitación de los glaciares propuesta por Lorenzo en 1964, en contorno más grueso la localización de los glaciares en estudio, estaciones y las flechas indican la dirección del desplazamiento de los glaciares.



**Figura 49.** Modelo digital en donde se observa el glaciar de Ayoloco, Sudoriental, la localización de las estaciones y estacas en el sistema de la Panza en el volcán Iztaccíhuatl.

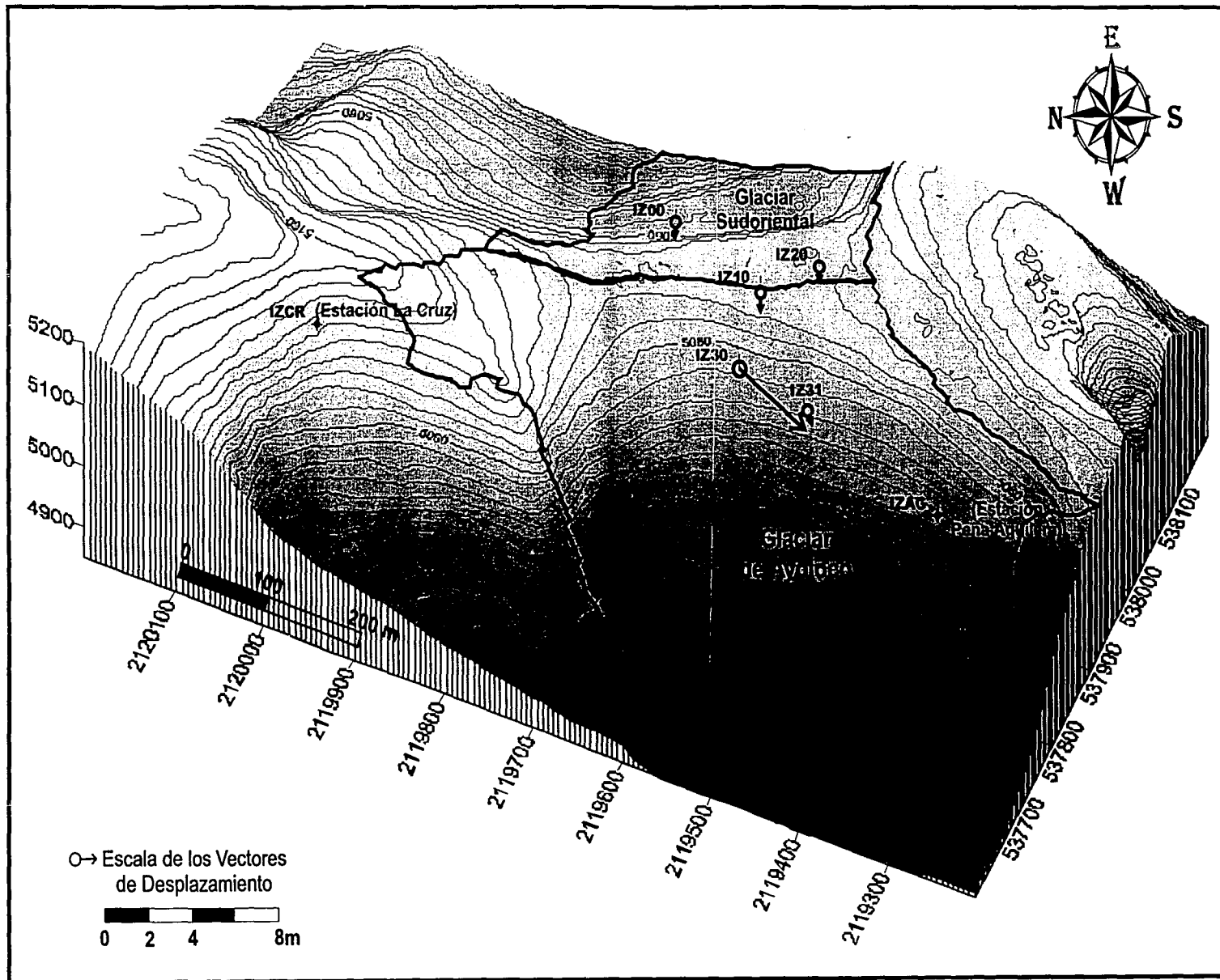


Figura 50. Modelo digital de elevación en donde se observa la delimitación del glaciar de Ayoloco visto desde el Oeste, la ubicación de las estaciones y los vectores de desplazamiento en los que se ha exagerado la escala para representarlos esquemáticamente.

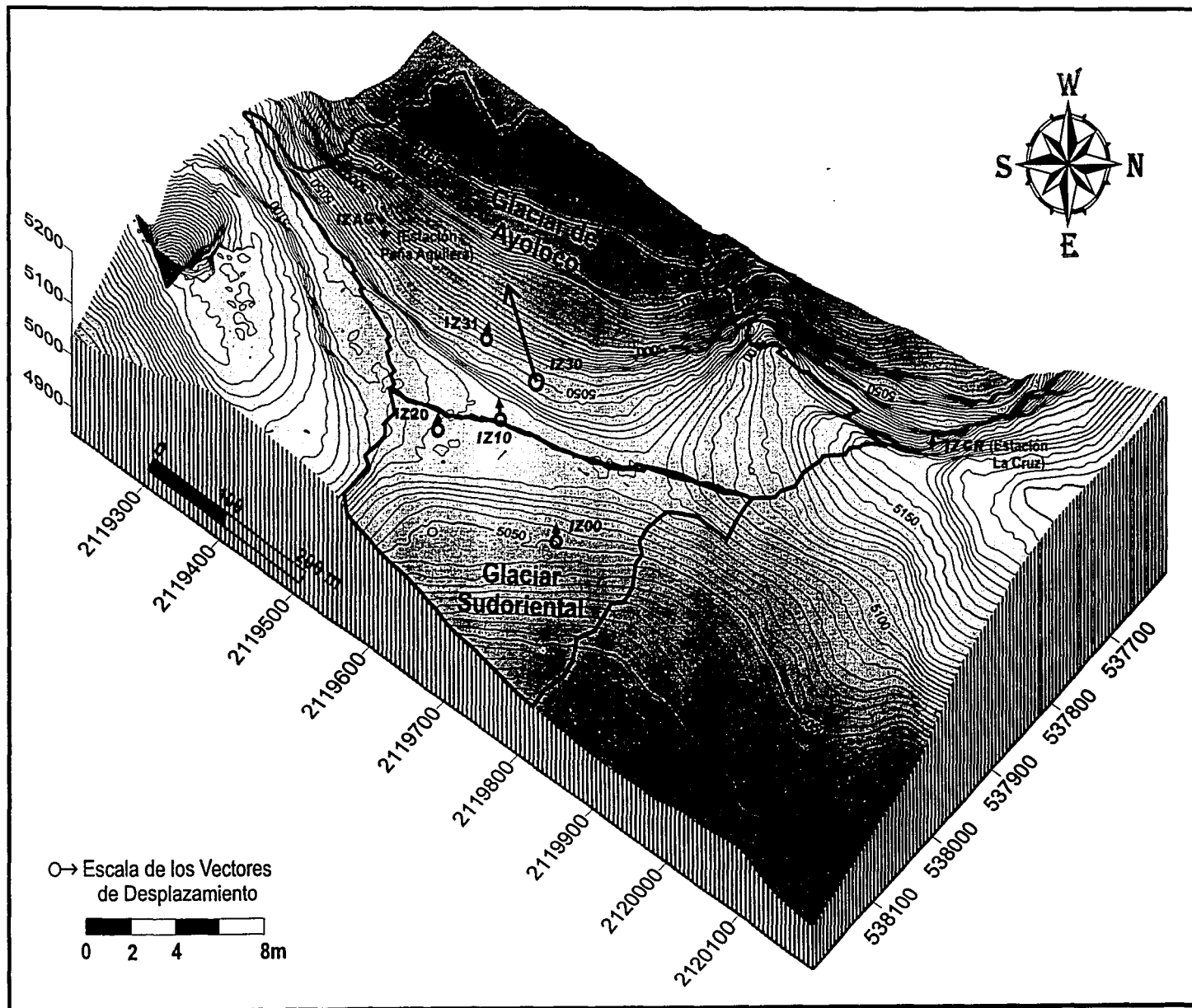


Figura 51. Modelo digital de elevación en donde se observa la delimitación del glaciar Sudoriental visto desde el Este, en segundo plano la delimitación del glaciar de Ayoloco, la ubicación de las estaciones y los vectores de desplazamiento en los que se ha exagerado la escala para representarlos esquemáticamente.

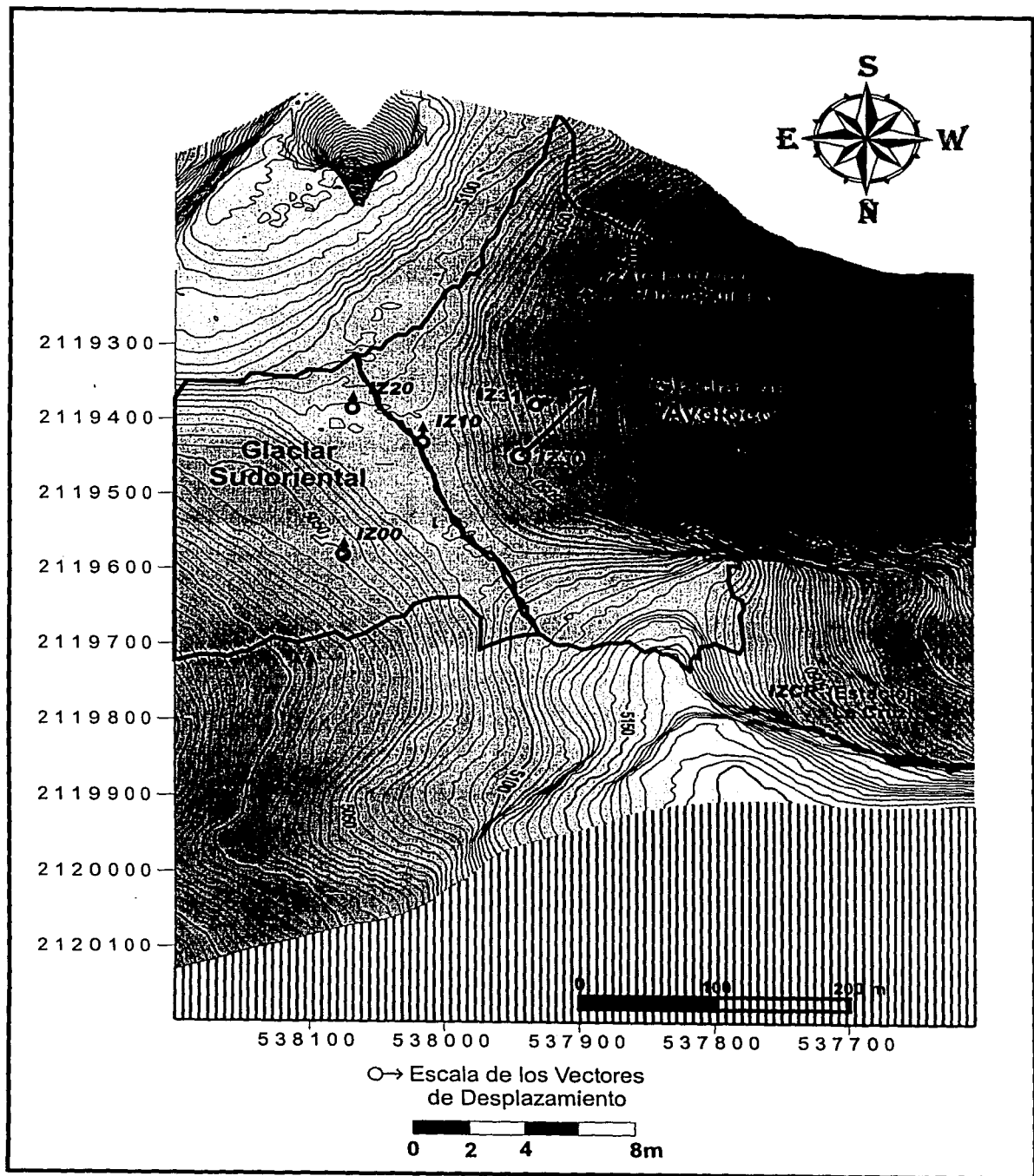


Figura 52. Modelo digital de elevación en donde se observa del lado izquierdo la delimitación del glaciar Sudoriental y del lado derecho superior la delimitación del glaciar de Ayoloco vistos desde el Norte, la ubicación de las estaciones y los vectores de desplazamiento en los que se ha exagerado la escala para representarlos esquemáticamente.

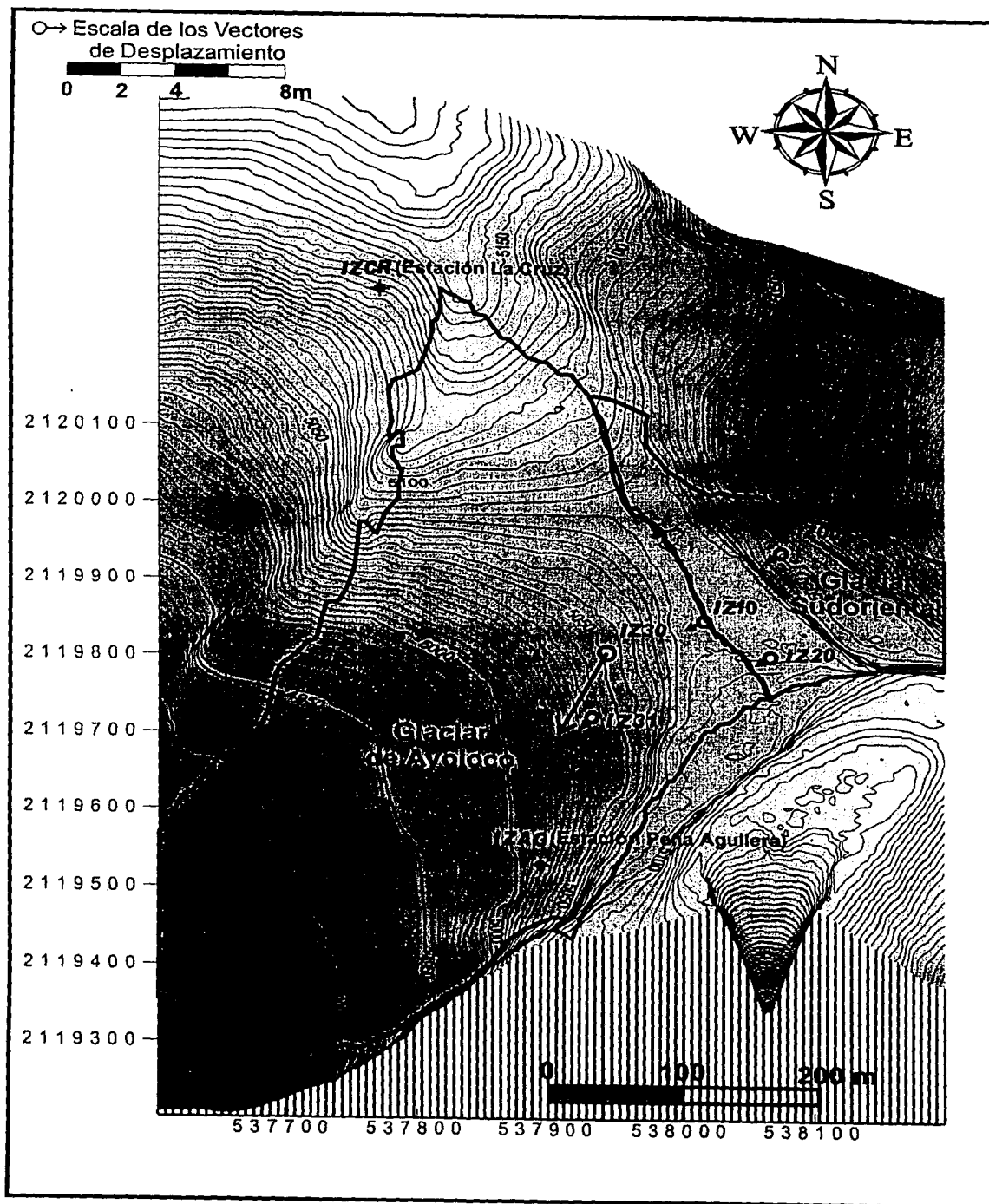


Figura 53. Modelo digital de elevación en donde se observa la delimitación del glaciar de Ayoloco del lado izquierdo y en la parte superior del lado derecho el límite del glaciar Sudoriental vistos desde el Sur, la ubicación de las estaciones y los vectores de desplazamiento en los que se ha exagerado la escala para representarlos esquemáticamente.