



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**ELABORACIÓN DE SOFTWARE PARA
PROCESAMIENTO DE DATOS METEOROLÓGICOS
Y SU USO EN EL ANÁLISIS DE DOS FENÓMENOS:
LA ALTURA DE LA ISOTERMA 0 °C SOBRE LOS
GLACIARES MEXICANOS Y EL CAMPO DE
VIENTOS PREDOMINANTE SOBRE ESTOS**

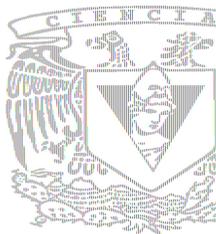
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A:

ERIC BENJAMÍN TÉLLEZ UGALDE



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. HUGO DELGADO GRANADOS
CIUDAD DE MÉXICO, 2019**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

1. Datos del alumno

Téllez

Ugalde

Eric Benjamín

5513367831

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

300565351

2. Datos del tutor

Dr.

Hugo

Delgado

Granados

3. Datos del sinodal 1

Dra.

Ana Cecilia

Conde

Álvarez

4. Datos del sinodal 2

Dr.

Robin Andre Lucien Perceval Tristan Didie

Campion

5. Datos del sinodal 3

Dr.

Adolfo Vicente

Magaldi

Hermosillo

6. Datos del sinodal 4

Dr.

Denis Xavier Francois

Legrand

7. Datos del trabajo escrito

Elaboración de software para procesamiento de datos meteorológicos y su uso en el análisis de dos fenómenos: la altura de la isoterma 0 °C sobre los glaciares mexicanos y el campo de vientos predominante sobre estos

137 pp.

2019

Índice

Índice de figuras y tablas	vi
Resumen	x
Parte A: Evolución de la isoterma 0 °C	1
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Hipótesis	2
1.4. Objetivos	3
1.5. Metodología	3
2. Marco teórico	5
2.1 Glaciares	5
2.1.1. Cambio climático	7
2.1.2. Tipos de glaciares	7
2.1.3. Glaciares tropicales	7
2.1.4. Glaciares mexicanos	8
2.2 Atmósfera	8
2.2.1. Estructura vertical de la atmósfera	9
2.3. Radiosondeos	10
2.3.1. Importancia de los radiosondeos	11
2.4. Oscilación Meridional El Niño	11
2.4.1. El Niño	12
2.4.2. La Niña	13
3. Datos	14
3.1 Origen	14
3.2 Información dentro del archivo de datos	16
4. Procesamiento de los datos	17
4.1. Suposiciones generales	17
4.2. Modificación del formato de la base de datos	18
4.3. Temperaturas	18
4.4. Series de tiempo	22
4.4.1. Componentes	23
4.5. Análisis espectral	24
4.5.1. Transformada de Fourier	24
4.5.2. Transformada de Fourier aplicada a la desestacionalización de la serie de tiempo	25

5. Resultados	27
5.1. Resumen de los resultados	27
5.2. Altura mensual promedio de la isoterma 0 °C y tendencia con aproximación lineal	27
5.2.1. Estación Tacubaya-Aeropuerto	27
5.2.2. Estación Veracruz	28
5.2.3. Comparación entre la altura de la isoterma 0 °C y la de los glaciares	28
5.3. Modelo con desestacionalización anual	30
5.3.1. Perfil anual de temperaturas	30
5.3.2. Estación Tacubaya-Aeropuerto	30
5.3.3. Estación de Veracruz	31
5.4. Modelo con desestacionalización de periodicidad de ENSO	32
5.4.1. Periodicidad de ENSO	32
5.4.2. Estación de Tacubaya-Aeropuerto	33
5.4.3. Estación de Veracruz	33
5.5. Comparación entre los pronósticos del modelo estacional anual y el modelo estacional con ENSO	34
6. Conclusiones	37
7. Apéndice 1. Manual de uso de programas	39
8. Apéndice 2. Programa C	44
9. Apéndice 3. Programa Matlab 1	47
10. Apéndice 4. Programa Matlab 2	56
11. Apéndice 5. Programa Shell	60
Parte B: Distribución de los vientos	63
<hr/>	
1. Introducción	63
1.1. Antecedentes	63
1.2. Planteamiento del problema	63
1.3. Hipótesis	64
1.4. Objetivos	64
1.5. Metodología	64
2. Marco Teórico	66
2.1. Patrones de los vientos	66
2.1.1 Patrones de viento en México	66
2.1.2 Patrones de viento en las cercanías de los volcanes	66

2.1.3 Estratificación de los vientos	67
2.2. Estadística direccional	68
2.2.1 Estadística circular descriptiva	69
2.2.2 Distribuciones de probabilidad de máxima entropía	70
2.2.2.1 Distribución de von Mises o de Tikhonov	70
3. Procesamiento de los datos	71
4. Resultados	75
4.1 Estación Tacubaya-Aeropuerto	79
4.2 Estación Veracruz	87
5. Conclusiones	91
6. Apéndice 1. Manual de uso de programas	92
7. Apéndice 2. Archivo comandomeses.sh	94
8. Apéndice 3. Programa principal Octave	95
9. Apéndice 4. Programa para graficar histograma cilíndrico	105
10. Apéndice 5. Programa para obtener la distribución de von Mises	107
11. Apéndice 6. Programa para Ashfall 1, Citlaltépetl	112
12. Apéndice 7. Programa para Ashfall 2, Valle de México	122
13. Apéndice 8. Programa para Ashfall 3, El Chichón	126
14. Apéndice 9. Programa para Ashfall 4, Popocatépetl	131
Bibliografía	133

Índice de figuras y tablas

Parte A

Figura 1. Zonas de un glaciar [Paterson, 1994]. En círculo rojo está la línea de equilibrio del glaciar que en teoría debería ser cercano a la isoterma 0 °C.	5
Figura 2. Estructura vertical de la atmósfera. Imagen tomada de Internet	10
Figura 3. Radiosonda. Imagen tomada de Conagua.	11
Figura 4. Estaciones de radiosondeo. Imagen tomada con Google Earth.	15
Figura 5. Distancias de las estaciones a sus glaciares más cercanos respectivos	17
Figura 6. Conversión del formato del archivo. Las negritas indican el cambio en la fecha.	18
Figura 7. Ejemplo de los datos buscados para un día específico.	19
Figura 8. Ejemplo gráfico de radiosondeo.	20
Figura 9. Comparación de los datos mensuales para la estación de la Ciudad de México. Los datos en azul son los procesados con el programa computacional que se escribió para este trabajo. Los datos en rojo son los reportados en la tesis de Pérez, en 2010. El MAPE es de 0.016.	21
Figura 10. Comparación de los datos anuales para la estación de la Ciudad de México. La curva en azul es los datos procesados con el programa computacional.	21
Figura 11. Transformada de Fourier de los datos de la altura de la isoterma 0 °C de la estación Tacubaya-Aeropuerto.	25
Figura 12. Altura promedio de la isoterma 0 °C para cada mes y su tendencia lineal para la estación 679 Tacubaya-Aeropuerto desde enero de 1948 hasta diciembre de 2017. Se puede apreciar una ligera tendencia a la alza.	27
Figura 13. Gráfica de la estación Veracruz.	28
Figura 14. Gráfica de la comparación entre altura del glaciar el Popocatepetl y altura mensual de la isoterma 0 °C.	29
Figura 15. Gráfica del promedio mensual contra altura del glaciar.	29
Figura 16. Gráfica del perfil anual de temperatura para cada estación. Esta gráfica es la base del modelo estacional.	30

Figura 17. Gráfica de la estación Tacubaya-Aeropuerto con desestacionalización. 31

Figura 18. Gráfica de la estación Veracruz con desestacionalización. 31

Figura 19. ENSO. Si la temperatura es mayor o menor a 0.5 °C de la temperatura media del océano durante 5 meses o más, se considera que hay fenómeno del Niño o la Niña respectivamente. 32

Figura 20. Transformada de Fourier de la serie de la Oscilación Meridional El Niño. 32

Figura 21. Se puede apreciar que el modelo estacional tiene la misma forma anual y solo aumenta un poco su altura, mientras que el modelo Niño-Niña sí varía en su perfil anual. 33

Figura 22. Gráfica de la comparación de los datos con el modelo estacional y con el modelo estacional más Niño-Niña. Se puede apreciar que el segundo modelo se acopla mejor a algunos picos. 33

Lista de tablas

Tabla 1. Estaciones de medición de altura en la República Mexicana. 14

Tabla 2. Pronóstico de la altura media de la isoterma 0 °C para cada mes del año 2129 con el modelo de desestacionalización anual para la estación 679 Tacubaya-Aeropuerto. Resaltada se muestra la altura justo por encima de la cima del volcán Iztaccíhuatl. A esta altura ya no existiría el glaciar. 34

Tabla 3. Pronóstico de la altura media de la isoterma 0 °C para cada mes del año 2066 con el modelo de desestacionalización anual más ENSO para la estación 679 Tacubaya-Aeropuerto. Resaltada se muestra la altura justo por encima de la cima del volcán Iztaccíhuatl. A esta altura ya no existiría el glaciar. 34

Tabla 4. Pronóstico de la altura media de la isoterma 0 °C para cada mes del año 2150 con el modelo de desestacionalización anual para la estación 692 Veracruz. Resaltada se encuentra la altura de la cima del volcán Iztaccíhuatl solamente como referencia con la estación anterior, aunque el glaciar del Citlaltépetl llega hasta los 5646 m s. n. m. 35

Tabla 5. Pronóstico de la altura media de la isoterma 0 °C para cada mes del año 2070 con el modelo de desestacionalización anual más ENSO para la estación 692 Veracruz. Resaltada se encuentra la altura de la cima del volcán Iztaccíhuatl solamente como referencia con la estación anterior, aunque el glaciar del Citlaltépetl llega hasta los 5646 m s. n. m. 36

Parte B

Figura 1. La estratificación de los vientos se puede ver gracias a las cenizas de esta erupción del Popocatepetl en el año 2011 [Rivera, 2011]. 67

Figura 2. Otra vista de la estratificación de los vientos. Conforme la fumarola sube, los vientos la mueven en diferentes direcciones que no son necesariamente opuestas o contrarias angularmente [La Vanguardia, 2019]. 68

Figura 3. Círculo con división polar de sectores circulares de 30°. 72

Figura 4. Convención angular y direccional de los vientos. 73

Figura 5. Histograma cartesiano de la distribución de la dirección del viento en el mes de junio para la estación Tacubaya-Aeropuerto. Cada grupo de datos representa un sector circular de 30°. Cada color representa un estrato de altura de 1000 metros ascendente de izquierda a derecha o, lo que es lo mismo, de azul a rojo. Estos estratos van desde 2000 m s. n. m. hasta 30000 m s. n. m. [Téllez, 2011]. 75

Figura 6. La misma base de datos de la imagen anterior (mes de junio en la estación Tacubaya-Aeropuerto), pero representada como un histograma cilíndrico. Los colores solo son para visualizar mejor la cantidad de cuentas en la estadística, es decir, el color azul representa pocas cuentas, mientras que el color rojo representa un número de cuentas mayor. En el plano horizontal se encuentra la dirección dividida en sectores circulares de 30°. En el eje z están los estratos de 1000 metros y van de 2000 m s. n. m. hasta 30000 m s. n. m. La dirección predominante varía con la altura [Téllez, 2015]. 75

Figura 7. Misma base de datos de la figura 5. Cada grupo representa un sector circular de 30°. Cada color representa un estrato de altura de 1000 metros ascendente de izquierda a derecha o de azul a rojo. Estos estratos van desde 5500 m s. n. m. hasta 10500 m s. n. m. [Téllez, 2011]. .. 76

Figura 8. Misma base de datos que la figura 5 y mismo histograma de la figura 7, pero representado como cilindro. Los colores solo son para visualizar mejor la estadística: azul representa pocas cuentas y rojo representa un número mayor. Son 5 estratos de 1000 metros cada uno y van desde 5500 m s. n. m. hasta 10500 m s. n. m. [Téllez, 2015]. 76

Figura 9. Enero. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Distribución de von Mises. 77

Figura 10. Enero. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Probabilidad por sector circular. 77

Figura 11. Febrero. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Distribución de von Mises. 78

Figura 12. Febrero. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Probabilidad por sector circular. 78

Figura 13. Marzo. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Distribución de von Mises. 78

Figura 14. Marzo. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Probabilidad por sector circular.	79
Figura 15. Abril. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Distribución de von Mises.	79
Figura 16. Abril. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Probabilidad por sector circular.	79
Figura 17. Mayo. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Distribución de von Mises.	80
Figura 18. Mayo. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Probabilidad por sector circular.	80
Figura 19. Junio. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Distribución de von Mises.	81
Figura 20. Junio. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Probabilidad por sector circular.	81
Figura 21. Julio. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Distribución de von Mises.	81
Figura 22. Julio. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Probabilidad por sector circular.	82
Figura 23. Agosto. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Distribución de von Mises.	82
Figura 24. Agosto. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Probabilidad por sector circular.	83
Figura 25. Septiembre. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Distribución de von Mises.	83
Figura 26. Septiembre. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Probabilidad por sector circular.	83
Figura 27. Octubre. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Distribución de von Mises.	84
Figura 28. Octubre. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Probabilidad por sector circular.	84
Figura 29. Noviembre. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Distribución de von Mises.	84
Figura 30. Noviembre. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Probabilidad por sector circular.	85
Figura 31. Diciembre. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Distribución de von Mises.	85
Figura 32. Diciembre. Estación Aeropuerto-Tacubaya. Probabilidad por sector circular.	85
Figura 33. Enero. Estación Veracruz. Distribución de von Mises.	86
Figura 34. Enero. Estación Veracruz. Probabilidad por sector circular.	86
Figura 35. Febrero. Estación Veracruz. Distribución de von Mises.	86
Figura 36. Febrero. Estación Veracruz. Probabilidad por sector circular.	86

Figura 37. Marzo. Estación Veracruz. Distribución de von Mises.	87
Figura 38. Marzo. Estación Veracruz. Probabilidad por sector circular.	87
Figura 39. Abril. Estación Veracruz. Distribución de von Mises.	87
Figura 40. Abril. Estación Veracruz. Probabilidad por sector circular.	87
Figura 41. Mayo. Estación Veracruz. Distribución de von Mises.	87
Figura 42. Mayo. Estación Veracruz. Probabilidad por sector circular.	87
Figura 43. Junio. Estación Veracruz. Distribución de von Mises.	87
Figura 44. Junio. Estación Veracruz. Probabilidad por sector circular.	87
Figura 45. Julio. Estación Veracruz. Distribución de von Mises.	88
Figura 46. Julio. Estación Veracruz. Probabilidad por sector circular.	88
Figura 47. Agosto. Estación Veracruz. Distribución de von Mises.	88
Figura 48. Agosto. Estación Veracruz. Probabilidad por sector circular.	88
Figura 49. Septiembre. Estación Veracruz. Distribución de von Mises.	88
Figura 50. Septiembre. Estación Veracruz. Probabilidad por sector circular.	88
Figura 51. Octubre. Estación Veracruz. Distribución de von Mises.	88
Figura 52. Octubre. Estación Veracruz. Probabilidad por sector circular.	88
Figura 53. Noviembre. Estación Veracruz. Distribución de von Mises.	89
Figura 54. Noviembre. Estación Veracruz. Probabilidad por sector circular.	89
Figura 55. Diciembre. Estación Veracruz. Distribución de von Mises.	89
Figura 56. Diciembre. Estación Veracruz. Probabilidad por sector circular.	89

Lista de tablas

Tabla 1. Datos de la figura 10.	77
Tabla 2. Datos de la figura 12.	78

Tabla 3. Datos de la figura 14.	79
Tabla 4. Datos de la figura 16.	79
Tabla 5. Datos de la figura 18.	80
Tabla 6. Datos de la figura 20.	81
Tabla 7. Datos de la figura 22.	82
Tabla 8. Datos de la figura 24.	82
Tabla 9. Datos de la figura 26.	83
Tabla 10. Datos de la figura 28.	84
Tabla 11. Datos de la figura 30.	85
Tabla 12. Datos de la figura 32.	85

Resumen

Esta tesis se divide en dos partes. En la primera, se tiene una pregunta, una base de datos y una hipótesis de cómo resolverla. Para resolver la pregunta se crearon herramientas computacionales para obtener información nueva a partir de la base de datos existente y se espera que esa información pudiera servir como una solución teórica al problema inicial. En la segunda parte, se expone un trabajo adicional en el que con las mismas herramientas creadas para obtener la solución anterior (o una ligera variante de estas), se revisan otros aspectos de la misma base de datos para ver si es posible obtener información nueva que pueda ser usada para refinar la solución al problema inicial o si incluso podría servir en otros problemas no tan relacionados. Esto implica que se usaron dos formas epistémicas de obtener información. La primera es la forma discursiva canónica de la construcción de la ciencia o “método científico”. La segunda se realizó de una manera un tanto más intuitiva sin tener un problema concreto que resolver, pero se obtuvieron resultados que ayudaron en tres tesis de licenciatura y una de maestría.

Concretamente, en la primera parte de este trabajo se procesaron los datos existentes tanto geográficamente como temporalmente de las temperaturas de todas las estaciones de radiosondeo del Servicio Meteorológico Nacional. De estos datos se estudió la evolución altitudinal de la isoterma 0 °C en la atmósfera y su relación con la desaparición de los únicos glaciares que quedan en México, dos en el volcán Iztaccíhuatl y uno en el volcán Citlaltépetl.

Para poder procesar la base de datos se hicieron varios códigos computacionales que se compararon con un resultado previo reportado para la estación de la ciudad de México. Los resultados se validaron estadísticamente y son aceptables. Después, con estos programas, se procesaron los datos crudos de la estación de radiosondeo de Veracruz que es la más cercana al Citlaltépetl. El resultado de este análisis demuestra que existe una tendencia creciente en la altura a la que se encuentra la temperatura 0 °C sobre todo en los últimos 10 años. En la ciudad de México la temperatura ha aumentado 0.9 °C en los últimos 70 años, mientras que en Veracruz el aumento ha sido menor pero apreciable, 0.5 °C.

Para refinar este análisis se incorporó la estacionalidad de El Niño y La Niña. Este modelo arroja resultados más precisos en cuanto a las variaciones mensuales, anuales y periódicas de la temperatura. El modelo pronostica la desaparición del glaciar del Iztaccíhuatl para el año 2066.

En la segunda parte de la tesis se expone el trabajo que se hizo para procesar los vientos de la misma base de datos. Se generaron distribuciones de probabilidad circular de los vientos entrantes y una estadística frecuencial por cada mes. Además se hizo una estratificación de los datos por alturas, es decir, se dividieron los datos en estratos de mil metros desde el nivel de la estación hasta aproximadamente 30000 metros. También se hizo algo similar desde el nivel de la cima de los volcanes hasta 10 mil metros.

Una novedad importante de este trabajo es que para visualizar la base de datos estratificada se programó desde cero un histograma cilíndrico, pues Matlab no contaba con un programa para hacerlo. Este programa se registró con licencia BSD. El resultado de los patrones de viento que se obtuvo es que se comportan como se esperaba de acuerdo a lo ya reportado antes en la literatura.

Parte A: Evolución de la isoterma 0 °C

A.1 Introducción

1.1 Antecedentes

Actualmente, el estudio del cambio climático resulta de gran interés pues sabemos que los gases de efecto invernadero se están acumulando en la atmósfera de la Tierra como resultado de la actividad humana, lo que causa que la temperatura superficial del aire y la subsuperficial del océano se incrementen [CSCC, 2001]. Esto ya tiene consecuencias conocidas en todo el mundo y estas, a su vez, repercutirán o ya están repercutiendo en la propia actividad humana [Carleton et al., 2016]. El tema es de gran importancia y su discusión abarca todos o casi todos los ámbitos humanos y, consecuentemente, el volumen de los datos generados y utilizados para estudiar este fenómeno a escala global y local es cada vez mayor. Es en este contexto que es importante crear programas computacionales para procesar estos datos. Además, es posible que una base de datos creada con un propósito en particular pueda servir para otros fines simplemente haciendo las preguntas correctas y diseñando programas específicos para extraer de ellas la información necesaria para responder esas preguntas y verificarlas o falsearlas.

Una de las tantas formas de estudiar el cambio climático es mediante la observación de los glaciares. Su avance y retroceso tiene gran relevancia pues estos son capaces de registrar el cambio climático y nos dan una clara muestra de los efectos climáticos a escala global, regional y local [Haerberli et al., 2007]. Así mismo, las altas montañas, dada su fuerte interacción con las condiciones climáticas locales y globales, representan uno de los mayores ambientes dinámicos sobre la Tierra. El monitoreo de los cambios en el terreno de estas es necesario para entender los sistemas de transporte de masa y detectar la variabilidad relacionada con el clima [Kääb, 2002]. Ya se conoce una tendencia mundial de retroceso de los glaciares de montaña debido a un calentamiento en el planeta Tierra. En particular, los glaciares del monte Kilimanjaro han tenido un gran retroceso en años recientes y se han convertido en un ícono del calentamiento global [Kaser et al., 2004]. Este caso es relevante pues estos glaciares también están en la región tropical y casi a la misma altura que los glaciares mexicanos. Los glaciares del Iztaccíhuatl se encuentran en (19.1776, -98.6414, 5230 m s. n. m.), los del Citlaltépetl en (19.0303, -97.2683, 5636 m s. n. m.) y los del Kilimanjaro más hacia el ecuador en (-3.0674247, 37.3556273, 5826 m s. n. m.). Es muy posible que el comportamiento en los glaciares de México sea similar.

En este punto es importante hacer la distinción entre *detección* y *atribución*. Ambas se definen de acuerdo a la terminología del artículo guía del IPCC. La *detección* de un cambio se define como el proceso de demostrar que el clima o un sistema afectado por el clima ha cambiado en algún sentido estadístico definido sin aportar una razón para ese cambio. Un cambio identificado se detecta en observaciones si su probabilidad de ocurrir por azar debido solamente a la variabilidad interna es pequeña [Hegerl et al, 2010]. La *atribución* se define como el proceso de evaluar las contribuciones relativas de factores causales múltiples a un cambio o evento con una asignación de una confianza estadística [Hegerl et al, 2010].

En México, los glaciares son sistemas físicos que quedan determinados tanto por la actividad volcánica como por las condiciones climáticas locales y globales. Debido a la actividad volcánica reciente y a la cercanía con las principales urbes en el territorio nacional, los estudios glaciológicos previos se han enfocado a los glaciares de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl y solo algunos se han realizado a fin de medir los efectos climáticos en los glaciares del volcán Citlaltépetl [Cortés, 2009].

En particular, una condición climática global cíclica que podría tener un impacto directo en el comportamiento de un glaciar es El Niño Oscilación del Sur (ENOS), también llamada Oscilación Meridional El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés); esta última nomenclatura es la que se usará en este trabajo. Este fenómeno climático tiene una periodicidad que no corresponde a la de un año y sus efectos son apreciables en un rango de décadas. Es posible que algunos de ellos impacten directamente a los glaciares mexicanos.

1.2 Planteamiento del problema

La motivación principal de este trabajo fue procesar datos meteorológicos que han sido tomados mediante radiosondeos. Los radiosondeos sirven para muchas cosas, entre ellas está el pronóstico el uso como datos primarios para el pronóstico del clima, la cantidad de lluvia en algunas regiones, para determinar las condiciones imperantes cerca de los aeropuertos, entre otras. Sin embargo también podrían ser usados para el estudios vulcanológico y glaciológico.

Los glaciares en México están situados en las altas montañas, todas ellas de origen volcánico con diferentes niveles de actividad y condiciones climáticas: Citlaltépetl, Popocatepetl e Iztaccíhuatl [Lorenzo,1964]. Los glaciares del Popocatepetl han desaparecido en años recientes [Delgado Granados et al, 2006], por lo que solo quedan para su estudio los glaciares del Iztaccíhuatl y del Citlaltépetl. La mejor forma de estudiarlos sería mediante mediciones directamente *in situ*; sin embargo, los aparatos de medición se instalaron en el año 2006 [Ontiveros, 2007], por lo que la base de datos existente no es suficientemente robusta para hacer un análisis. Se pensó, entonces, que otra forma de obtener datos sería mediante el uso de datos meteorológicos, de los cuales se tiene un registro de aproximadamente 60 años. Aunque los datos podrían ser no tan precisos debido a la instrumentación usada para obtenerlos y no tan exactos debido a la lejanía con el glaciar desde el punto de medición.

Un perfil de temperatura atmosférica que varía según la altitud puede proporcionar información valiosa, ya que se puede encontrar en los sistemas montañosos la altitud exacta de la temperatura 0 °C, es decir, donde el agua tiene su punto de fusión y por la tanto la posible existencia de glaciares. A esta línea se le conoce como isoterma 0 °C [Pérez, 2010]. Esta información se puede obtener mediante un globo meteorológico que registra diversas variables de estado termodinámicas mientras asciende en la atmósfera; entre ellas está la temperatura, la presión. Además de éstas, también se registra la velocidad y la dirección del viento. A este globo se le llama *radiosondeo*.

Hasta hace poco, México no contaba con un registro evolutivo de la isoterma 0 °C obtenido mediante el uso de datos provenientes de los radiosondeos. Es hasta la tesis de Pérez en 2010

que se ve su importancia y se decide que posteriormente se procese, por completo, la base de datos existente y no solo la de la Ciudad de México. Con ayuda de los radiosondeos se podría obtener un perfil de la temperatura atmosférica con respecto de la altura. De esta manera, resulta relativamente sencillo encontrar la altitud de la isoterma 0 °C y así se puede realizar un estudio evolutivo para finalmente obtener una tendencia general.

Para comparar la evolución de la isoterma 0 °C con el retroceso glaciar se requiere de un modelo más completo, uno con más variables, sin embargo se supone que el uso de la temperatura es una primera aproximación al problema general.

1.3 Hipótesis

Se piensa que el retroceso glaciar está asociado con una elevación de la temperatura ambiente que inhibe la preservación del hielo. Esta causa podría ser determinante aunque no única. Ante la ausencia o poca existencia de datos obtenidos directamente sobre los glaciares, una forma de estudiar indirectamente el incremento de la temperatura regional alrededor del volcán y, específicamente, de su cima glaciar, es usando datos de radiosondeos para estimar la altitud de la isoterma 0 °C.

Se piensa que la temperatura ambiente a nivel del suelo ha aumentado en los últimos 70 años y que esto debería ser cierto para la tropósfera en general. Es decir, la temperatura a la altura a la que se encuentran los glaciares también debería haber aumentado en ese mismo lapso.

Además, se piensa que la Oscilación Meridional El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés) podría tener algún efecto en relación con la desaparición de los glaciares. En caso de que la temperatura no explique con suficiencia el cambio en el balance de masa de los glaciares mexicanos, habría que incorporar los efectos de ENSO.

1.4 Objetivos

Objetivo principal

Se pretende demostrar que la evolución temporal de la isoterma 0 °C es ascendente con respecto de la altura sobre el nivel del mar y tiene una relación directa con el retroceso de los glaciares del Iztaccíhuatl y del glaciar Jamapa en el Citlaltépetl.

Objetivos secundarios

- Procesar la base de datos existente del Servicio Meteorológico Nacional de la temperatura de todas las estaciones de radiosondeo del país.
- Encontrar un modelo desestacionalizado anual para modelar el comportamiento de la isoterma 0 °C.
- Encontrar un modelo desestacionalizado para modelar el comportamiento de la isoterma 0 °C, que incorpore la Oscilación Meridional El Niño (ENSO).

1.5 Metodología

En esta tesis, usted, persona lectora, encontrará el procesamiento de los datos meteorológicos de los últimos 60 años. Estos datos fueron recabados por el Servicio Meteorológico Nacional exactamente a partir de 1948, mediante *radiosondeos*.

Primero, se obtuvo esta base de datos desde enero de 1948 y hasta diciembre de 2017. En total son 15 estaciones que tienen datos desde 1948 en el caso de las más antiguas, y desde 1995, en el caso de las más recientes. Casi todas tienen algunos años o meses en los que no hay datos. Para procesar esta base de datos se utilizaron varios códigos de programación. Principalmente, se utilizó un código en C++ para dos cosas; en primer lugar para cambiar el formato de los datos originales a un formato que fuera más fácil de procesar y en segundo porque la base de datos original contiene muchos errores en los primeros años debido posiblemente a que la electrónica de la época no era tan confiable. Después, debido a que a partir de 1998 el formato de los datos cambió, se usó un segundo programa, que básicamente son un conjunto de instrucciones en Shell, para procesar estos datos y juntarlos con los anteriores en una sola base de datos uniforme. Finalmente, se realizó un código de programación para Octave o Matlab para encontrar la altura a la cual se encuentra la temperatura de 0 °C, es decir, la isoterma 0 °C. Este mismo programa, que es el más importante del trabajo, se usó para ordenar estos datos en una serie de tiempo para su posterior visualización gráfica.

Para el análisis estadístico de la temperatura se utilizaron series de tiempo. Se incorporó además un análisis de Fourier para encontrar periodicidades diferentes a los periodos anuales y con esto se pudo refinar el análisis de la serie de tiempo completa que incorpora las posibles estacionalidades debidas al fenómeno de El Niño. Finalmente se hizo un modelo de tendencia lineal que resume los cálculos previos.

A.2 Marco teórico

2.1 Glaciares

Existen varias definiciones de *glaciar*. En general, estas dependen del campo de estudio específico en donde se genere o se necesite esa definición. Por ejemplo, una definición para cálculo de área por medio de imágenes satelitales puede distar de otra que podría dar una asociación de alpinismo profesional. Para este trabajo se usó la definición del IPCC 2018: Una masa de hielo permanente, y posiblemente firn y nieve que se origina en la superficie del terreno por la recristalización de la nieve y que muestra evidencia de flujo pasado o presente. Un glaciar normalmente gana masa por acumulación de nieve y pierde masa por derretimiento y descarga de hielo en el mar o en un lago si el glaciar termina en un cuerpo de agua.

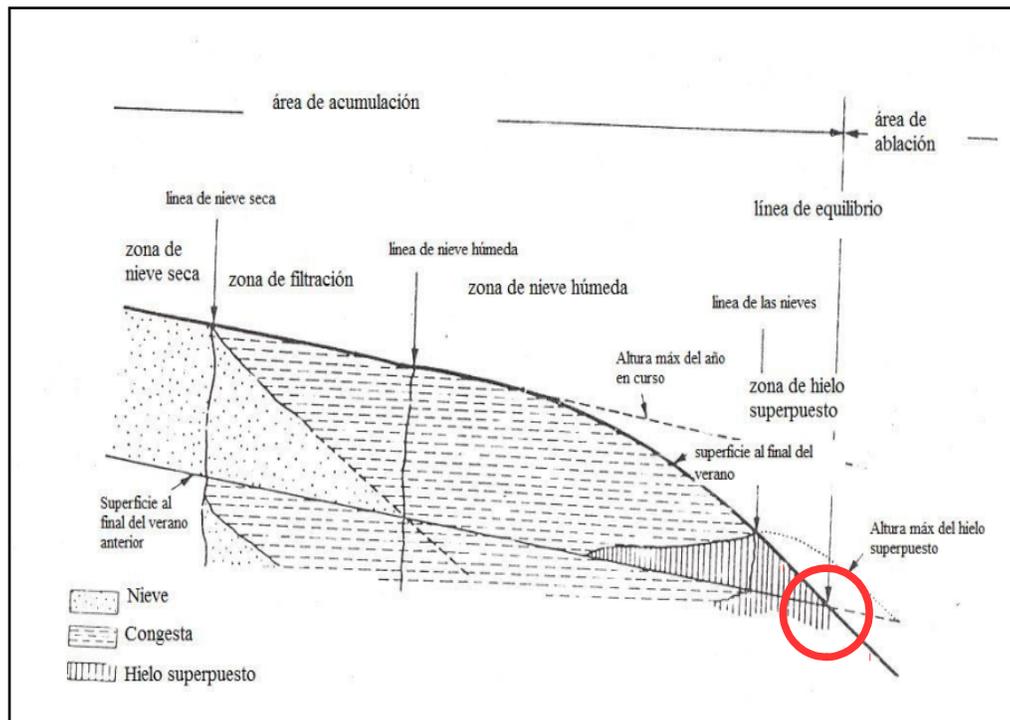


Figura 1. Zonas de un glaciar [Paterson, 1994]. En círculo rojo está la línea de equilibrio del glaciar que en teoría debería ser cercano a la isoterma 0°C.

La frontera más baja de la zona de acumulación del glaciar se conoce como la línea de equilibrio. Esta línea móvil debería estar, en promedio, a 0 °C. Por encima de ella el glaciar tiene una ganancia de masa durante el año. Debajo de ella hay una pérdida de masa. Esa línea de equilibrio es el límite entre la zona de acumulación y la zona de ablación o fusión (círculo rojo).

Los cambios en los glaciares se estudian en término del área, del grosor del hielo y de características morfológicas [Huggel y Delgado, 2000]. El balance de masa, B , podría ser la medición más significativa para estudiar cambios en los glaciares. Esta se define como la suma algebraica de la masa de acumulación y la de ablación en el glaciar.

La reacción en la altitud de la línea de equilibrio a un calentamiento o enfriamiento depende del gradiente del balance vertical de masa [Kaser y Osmaston, 2002]. Entonces, la manera más sencilla de relacionar el cambio climático y el balance de masa de un glaciar es suponiendo que la línea de equilibrio (límite inferior de la masa glaciar) se asocia con la isoterma 0 °Celsius de la atmósfera, en tanto que la distribución con respecto de la altitud de un área glaciar y el balance de masa específica permanece inalterada. Específicamente, como sabemos que para la mayoría de los glaciares alpinos (no necesariamente así para los glaciares tropicales) el gradiente dB/dz es lineal [Kuhn et al, 1985] y que además en la línea de equilibrio el balance de masa es igual a cero por ser el límite del glaciar, podemos suponer que

$$B(z) = \frac{dB}{dz} \cdot (z - zLE) , \quad (1)$$

donde B es el balance de masa, z la altura y zLE la altura de la línea de equilibrio (Kuhn et al, 1985). Además sabemos que la temperatura de la atmósfera, T , disminuye conforme la altura aumenta. Esto quiere decir que el cambio de la temperatura, T , con respecto de la altura, z , es una constante negativa para el dominio y el rango de esta función, es decir, en la tropósfera; entonces

$$\frac{dT(z)}{dz} = -a , \quad (2)$$

con a una constante y z la altura. Sabemos que existe zLE que es la altura de la línea de equilibrio tal que

$$T(zLE) = -a \cdot zLE = TLE , \quad (3)$$

con TLE la temperatura de la atmósfera en la línea de equilibrio. Si suponemos que la relación con el glaciar es directa no depende de otras variables. Entonces hacemos la sustitución de (3) en (1) y tenemos que

$$B(T(z)) = \frac{dB}{dT(z)} \cdot (T(z) - TLE) = \frac{dB}{dz} \cdot (T - TLE) , \quad (4)$$

De donde tenemos que existe una relación lineal entre la temperatura y la cantidad de masa del glaciar, suponiendo que el glaciar se comporta como un glaciar alpino.

Ahora, para relacionar la temperatura con el comportamiento del glaciar habría que ver si se cumple que $TLE = 0$, es decir, que la temperatura de la línea de equilibrio sea igual a la temperatura de la isoterma 0 °C, y esta temperatura está a una altura dada. Esto es lo mismo que preguntarse para qué valores de z menores a la altura de la montaña se cumple que

$$T(z) = 0 , \quad (5)$$

y, por tanto,

$$B(T(z)) = 0 , \quad (6)$$

Si existen valores de $T(z) < 0$ para los que se cumpla la ecuación (6) quiere decir que la línea de equilibrio está en una altura mayor que la isoterma $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ o, lo que es lo mismo, que el glaciar se está derritiendo a una temperatura atmosférica inferior al punto de congelación del hielo. Si existen valores $T(z) > 0$ en los que se cumpla la ecuación (6) indicaría que la línea de equilibrio está a una altura más baja que la isoterma $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ o, lo que es lo mismo, que el glaciar se está derritiendo a una temperatura atmosférica superior al punto de congelación.

2.1.1 Cambio climático y glaciares

La sensibilidad climática de un glaciar depende del clima local y de otros factores, tales como efectos topográficos y la distribución del glaciar con la altitud. Como consecuencia de la sensibilidad a un cambio climático depende fuertemente del régimen climático o donde se encuentra el hielo [Kuhn et al., 1985]. Cambios en las condiciones atmosféricas, tales como la radiación solar, temperatura del aire, precipitación, vientos, etc., influyen en el balance de energía y masa en la superficie de un glaciar [Oerlemans, 2001]. La sensibilidad de los glaciares tropicales a las oscilaciones climáticas cortas y, particularmente, a las temperaturas, refuerza su interés como indicadores del clima y de su evolución [Francou et al., 1995].

2.1.2 Tipos de glaciares

Los glaciares se pueden clasificar de diversas formas. De acuerdo a la zona climática en la que se encuentran, se clasifican como tropicales, de latitudes medias y polares [Hambrey y Alean, 2004]. Esta clasificación no es estricta y obedece a la forma en que la radiación solar incide sobre la zona de interés y a la manera en que se comporta la humedad llevada por la circulación de la atmósfera. Se detalla a continuación la información al respecto de los glaciares tropicales, puesto que esta clasificación es la que mejor identifica a los glaciares mexicanos. Sin embargo, estos últimos tienen particularidades y por eso también se exponen un poco más adelante en su propio apartado.

2.1.3 Glaciares tropicales

El conocimiento que se tiene acerca de los glaciares se ha obtenido directamente de glaciares como los de los Alpes. Sin embargo, el comportamiento de los glaciares en los Alpes no es comparable con el de otras zonas, ya que las condiciones climáticas y las variaciones propias del lugar hacen que estos adquieran otras dinámicas y presenten diferentes características. Muchos de los glaciares de otras zonas tienen un comportamiento tan complejo en los climas de alta montaña que es difícil reconstruirlos con base en las ideas que se tienen de los glaciares alpinos (Kase y Asomaston, 2002).

Actualmente, la situación ha cambiado mucho ya que el conocimiento de los glaciares en alta montaña está aún centrado en base a los estudios de los glaciares alpinos; a pesar de los trabajos hechos por Llibutry (1956), Whittow (1984), Hastenrath (1991), Kaser (1999), entre otros. Las preguntas y los problemas se incrementan para la glaciología de las montañas tropicales, sin embargo, estas son tan importantes como las que surgen para los glaciares en otras regiones del mundo.

Las mediciones y características del clima varían entre las zonas templadas y las zonas de latitudes bajas; particularmente en estas últimas, la atmósfera es en gran parte homogénea. Es particularmente cierto solo para el carácter térmico de la atmósfera. Por lo que la relación que existe en los glaciares y el clima en zonas tropicales es difícil de determinar puesto que la precipitación en estas zonas muchas veces está determinada por diversos fenómenos naturales relacionados con la posición geográfica y las anomalías climáticas en las latitudes bajas [Cortés, 2009].

2.1.4 Glaciares mexicanos

En México, el estudio de los glaciares comenzó en el siglo 18 cuando el padre José Antonio de Alzate y Ramírez realizó por primera vez mediciones barométricas en el volcán Iztaccíhuatl [Lorenzo, 1964]. El volcán Citlaltépetl, por su lejanía respecto a la ciudad de México y sus relativas dificultades de acceso, ha sido poco estudiado en su aspecto glaciológico. Así, las primeras menciones encontradas por Lorenzo (1964) son de Waltz (1910) y Blázquez (1957). Sin embargo, en años recientes se han realizado estudios para comprender su dinámica y, en particular, se ha realizado la adquisición de datos meteorológicos enfocada a la determinación del balance de energía [Delgado Granados et al., 2006].

Los glaciares del volcán Popocatepetl han desaparecido a causa de la acción conjunta del vulcanismo y los factores climáticos tanto regionales como locales pues la atmósfera cercana a este volcán [Delgado Granados, 2007] se encuentra afectada por su cercanía a las ciudades de México y Puebla [Julio Miranda y Delgado Granados, 2003]. Excepto por la actividad volcánica, se puede decir lo mismo de los glaciares del Iztaccíhuatl. Por su parte, el volcán Citlaltépetl se encuentra alejado de grandes centros urbanos y por lo tanto, su atmósfera cercana solo se ve afectada por factores climáticos de escala regional y global. Además este volcán no presenta actividad volcánica importante, lo cual indica que no ha habido alguna actividad que modifique significativamente el comportamiento glaciario.

Los glaciares mexicanos, al estar fuera de la zona intertropical de convergencia, no se consideran tropicales en términos estrictos, sin embargo, tienen una estación húmeda y una seca como sucede en algunas regiones en los trópicos. La razón de esto es que la circulación del hemisferio norte causa condiciones secas de diciembre a abril y los vientos del noreste traen humedad del Caribe entre mayo y octubre [Kaser et al, 2003]. Además, se ha observado su retroceso, así como el de la mayoría de los glaciares en el mundo, lo cual ha sido asociado con el calentamiento global de origen antropogénico.

Los glaciares mexicanos son sistemas naturales que han ido evolucionando drásticamente debido a su gran interacción dinámica con otros sistemas como los volcánicos y los fenómenos de la atmósfera que los rodea. A diferencia de otros glaciares, ubicados en zonas geográficas donde las condiciones climáticas permiten mantenerse en equilibrio, estos, por su parte, se ubican en una zona donde las condiciones climáticas son un factor determinante para el desequilibrio y la pérdida consecuente de masa [Cortés, 2009]. De hecho, son únicos en esta latitud, lo que resulta relevante en términos de la información climática regional que podría obtenerse de su estudio sistemático [Delgado Granados, 1997; Delgado Granados, 2007].

2.2 Atmósfera

El tiempo se define como el estado físico de la atmósfera en corto tiempo. Varía día a día (de hecho es una variación continua) y es descrito en términos de variables como la temperatura, nubosidad, precipitación, dirección y velocidad el viento [Moran et al., 1997]. El tiempo meteorológico es el resultado de procesos atmosféricos que intentan igualar las diferencias en la distribución de la energía proveniente de la radiación solar [Critchfield, 1983]. Al hacer una extrapolación a largo plazo, todos estos procesos de intercambio dan lugar al clima [Pérez, 2010].

La atmósfera es una capa delgada de gases y partículas suspendidas que envuelven al planeta. Es móvil, compresible y expansible. Su densidad decrece con la altitud. Aproximadamente la mitad de la masa total de la atmósfera se encuentra por debajo de los 5500 m s. n. m. La atmósfera actúa como un protector de los efectos de la radiación solar y previene de pérdidas excesivas de calor en la noche.

Cuatro gases (nitrógeno, oxígeno, argón, y dióxido de carbono) forman el 99% del aire seco de la atmósfera. También contiene pequeñas cantidades de helio (He), metano (CH₄), hidrógeno (H₂), ozono (O₃) y otros gases. Aparte de los gases, la atmósfera de la Tierra contiene partículas sólidas y líquidas llamadas aerosoles; por ejemplo, el agua en sus tres estados (vapor, pequeñas gotas y cristales de hielo). Su origen ocurre proviene de incendios forestales, erosión del suelo, emisiones volcánicas, polvo de meteoritos y actividad industrial y agrícola [Moran et al., 1997].

La concentración de aerosoles es muy baja, sin embargo contribuyen en importantes procesos, por ejemplo la formación de nubes y la precipitación de las mismas. Algunos influyen en la temperatura del aire al interactuar con la radiación solar. El ozono (O₃) es producto de una recombinación del oxígeno bajo la influencia de la radiación ultravioleta [Critchfield, 1983].

Ligeros cambios en la concentración del ozono pueden tener efectos perjudiciales en la biósfera. El monóxido de carbono (CO) así como los óxidos de nitrógeno (N_xO_y) que incluyen los resultantes de la actividad humana, si se encuentran en concentraciones que amenacen el bienestar de los seres vivos, se consideran agentes contaminantes y son posibles causantes del cambio climático [Pérez, 2010].

2.2.1 Estructura vertical de la atmósfera

La atmósfera se divide en cuatro capas: la tropósfera, estratósfera, mesósfera y la termósfera (figura 2). La mayoría de los eventos meteorológicos ocurren en la tropósfera, que se extiende desde la superficie de la Tierra hasta una altitud de 6 km en los polos y 16 km en el Ecuador. Normalmente la temperatura decrece con la altitud, en promedio la temperatura cae 6.5 °C cada 1000 m. Esto se puede demostrar al tomar una razón de intervalo adiabático constante y al integrar sobre la temperatura sobre la altura se obtiene una función lineal [Adem, 1961].

El límite superior de la tropósfera se conoce como tropopausa, es una zona de transición donde la temperatura se mantiene constante. La siguiente capa de la estratósfera, que se extiende hasta los 50 km. En la parte baja de la estratósfera la temperatura se mantiene constante. Aproximadamente a los 20 km de altura la temperatura crece, esto se debe a la absorción de radiación ultravioleta por parte del ozono. En el límite de la estratósfera, donde la concentración de ozono disminuye, se encuentra la estratopausa. Aquí la temperatura es aproximadamente

igual a la del nivel del mar. A partir de los 50 km y hasta los 80 km se encuentra la mesósfera. La temperatura decrece lentamente con la altitud. La mayoría de los meteoritos se desintegran en la mesósfera. El límite en los 80 km se conoce como la mesopausa. Aquí se registran las temperaturas más bajas de la atmósfera (aproximadamente $-95\text{ }^{\circ}\text{C}$). En la termósfera la temperatura es muy variable, en los primeros kilómetros se comporta como una isoterma, sin embargo aumenta rápidamente. Puede llegar a tener temperaturas cercanas a los $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entre los 80 y los 400 km se halla la ionósfera. Se llama así por la alta concentración de iones. Partículas del Sol de alta energía chocan y gracias a la excitación con la ionósfera, se forman las auroras boreales o australes. El máximo de este proceso ocurre en los polos. Esto es porque el campo magnético de la Tierra desvía las partículas. La ionosfera refleja las señales de radio que provienen de la Tierra.

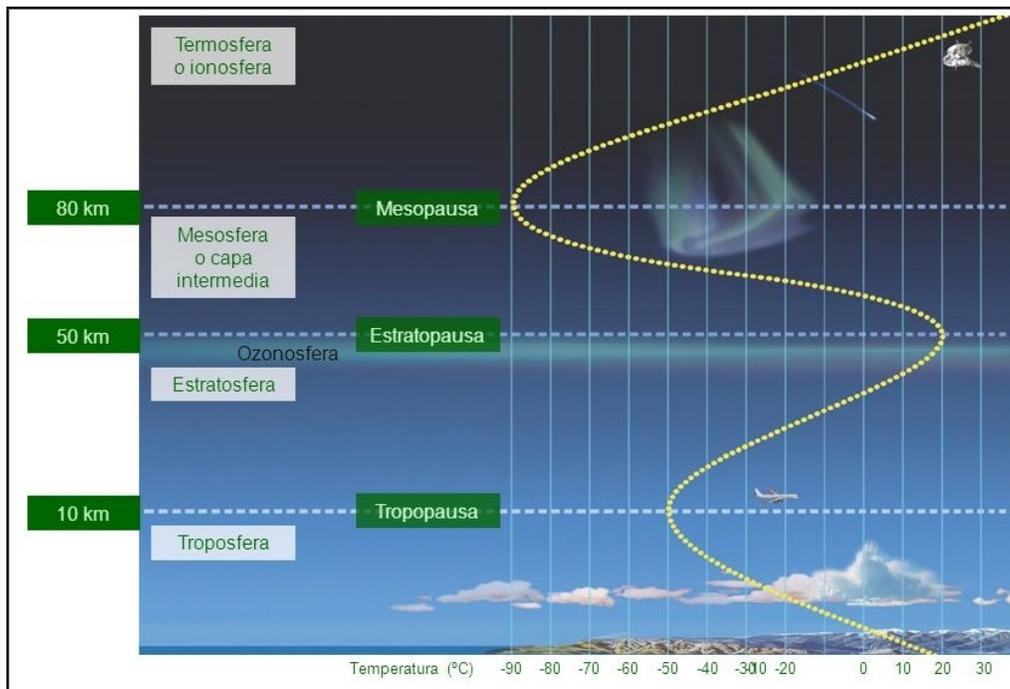


Figura 2. Estructura vertical de la atmósfera [Vazquez, 2019].

2.3 Radiosondeos

Para obtener información de las propiedades de la atmósfera es necesario realizar mediciones. Las observaciones que dan información de la distribución vertical de elementos meteorológicos se conocen como radiosondas [Reinish, 2000].

Una radiosonda consiste de una sonda electrónica unida a un globo inflado con helio o hidrógeno que asciende hasta los 30 km de altitud. Mientras el radiosondeo vuela a través de la atmósfera, los sensores de la sonda toman perfiles de temperatura, presión y humedad [NOAA, 2009], además de otras variables como por ejemplo, la velocidad y las dirección del viento. La transmisión de datos se debe a un radiotransmisor anexo a la sonda. Los datos son rastreados desde la estación en tierra por una antena de recepción que generalmente tiene una

radiofrecuencia entre 1675 y 1685 MHz. Esta, a su vez, está conectada a una computadora que visualiza los datos cada dos segundos (figura 3).

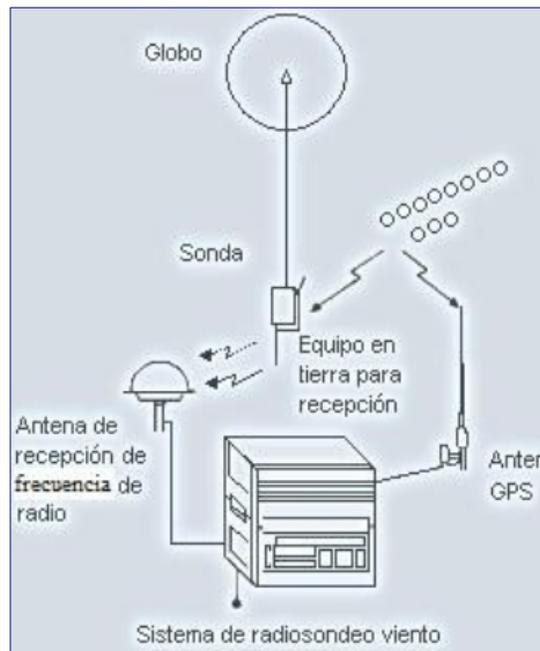


Figura 3. Radiosonda [CONAGUA, 2018].

La caja de la sonda tiene un recubrimiento de unicel, lo que la aísla. La sonda consta de un sensor externo de temperatura y humedad que consiste en un capacitor de película delgada que se dilata o contrae según la temperatura. Un segundo capacitor determina la humedad en función de la temperatura. La presión se mide con una cápsula aneróide que se expande conforme el globo asciende o se contrae cuando el globo se revienta y cae la sonda. El sistema de velocidad y dirección del viento viene dado por un pequeño GPS que lleva la sonda y en cada momento indica su localización y por lo tanto la dirección y velocidad del viento en m/s.

Todos los sensores están conectados a una batería que suministra entre 200 y 300 miliwatts. Las unidades de medida son el hectopascal (hPa) para la presión atmosférica, grado centígrado (°C) para la temperatura y el tanto por ciento (%) para la humedad relativa.

El globo es de neopreno o caucho sintético que resiste la humedad, bajas temperaturas, radiación ultravioleta y ozono. Se infla con hidrógeno y llega a medir hasta 150 cm de diámetro y levanta un peso de 450 g.

2.3.1 Importancia de los radiosondeos

Entender y predecir con precisión los cambios en la atmósfera requiere de observaciones. El radiosondeo es la primera fuente de datos verticales de la atmósfera. Estos datos son de gran utilidad especialmente para el diagnóstico de situaciones meteorológicas con fuerte inestabilidad de estratificación que pueden ocasionar lluvias intensas [Meteosort, 2009].

Los radiosondeos se usan para hacer modelos de predicción climáticos, investigación en cambio climático, modelos de aire contaminado, etc. Además en este trabajo se intentarán usar para estudiar los glaciares.

En el mundo hay aproximadamente 900 estaciones de radiosondeos, la mayoría localizadas en el hemisferio Norte. Todas las observaciones se da en la misma hora (00:00 y 12:00 UTC), los 365 días del año.

2.4 Oscilación Meridional El Niño

El Niño y La Niña son fases opuestas de lo que se conoce como Oscilación Meridional El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés) o también El Niño Oscilación del Sur. El ciclo ENSO es un término científico que describe las fluctuaciones en la temperatura entre el océano y la atmósfera en el Pacífico ecuatorial centro-oriental (aproximadamente entre la Línea Internacional del Tiempo y los 120 °W).

A veces se le conoce a La Niña como *la fase fría* de ENSO y a El Niño como *la fase caliente*. Este fenómeno también contiene una fase neutra.

Normalmente, los eventos de El Niño y La Niña duran de 9 a 12 meses, pero algunos se pueden prolongar durante años. Aunque su frecuencia pudiera ser muy irregular, los eventos de El Niño y La Niña ocurren en promedio desde cada dos hasta cada siete años.

Al fenómeno ENSO se le conoce como un modo de variabilidad climática. Este modo tiene un impacto global en la variabilidad interanual de la temperatura promedio global. Tiene influencia en las condiciones de tiempo severo y en la actividad ciclónica tropical a nivel planterio. Las fases presentan diferentes impactos en muchas regiones [RMCC,2015].

Estimaciones basadas en modelos climáticos muestran evidencia de una posible duplicación en la ocurrencia futura de eventos de El Niño como respuesta al calentamiento por gases de efecto invernadero [Cai, et al., 2014].

2.4.1 El Niño

Aunque los incas ya conocían este fenómeno, el nombre de El Niño se lo dieron los pescadores de la costa de Sudamérica en los años 1600, con la aparición de agua inusualmente caliente en el océano Pacífico. El nombre se le puso por las épocas del año (alrededor de diciembre, debido al niño Jesús) durante la cuáles estos eventos de aguas cálidas tendían a ocurrir.

El término *El Niño* se refiere a la interacción climática a gran escala océano-atmósfera ligada a un calentamiento periódico en las temperaturas de la superficie del océano en todo el Pacífico ecuatorial central y centro-oriental.

Normalmente, los efectos de El Niño tienden a desarrollarse sobre Norteamérica durante el siguiente invierno. Estos incluyen temperaturas más cálidas que el promedio sobre el centro y

occidente de Canadá, y sobre el norte y occidente de Estados Unidos. Son probables condiciones más húmedas que el promedio sobre partes de la costa del Golfo de México y Florida, mientras que se esperan condiciones más secas que el promedio en el valle de Ohio y el noroeste del Pacífico. La presencia de El Niño puede influir de manera significativa en patrones climáticos, condiciones oceánicas y pesquerías marítimas en extensas partes del globo por un periodo grande de tiempo.

En México, los veranos que siguen al fenómeno de El Niño son más secos que el promedio, mientras que los inviernos son más fríos de lo normal [Magaña et al., 1999].

2.4.2. La Niña

La Niña a veces también se llama *El Viejo*, *anti-El Niño* o simplemente *un evento frío*.

Los eventos de La Niña representan periodos de temperaturas de la superficie del océano por debajo del promedio a lo largo del Pacífico ecuatorial centro-oriental. Los impactos de La Niña en el clima global tienden a ser opuestos a los de El Niño. En los trópicos, las variaciones de la temperatura de los océanos en La Niña también suelen ser opuestos a los de El Niño.

Durante un año en el que haya La Niña, las temperaturas invernales son más calientes de lo normal en el sureste y más calientes de lo normal en el noroeste.

En el centro de México, los veranos que siguen a La Niña presentan lluvias excesivas e inviernos secos.

A.3 Datos

3.1 Origen

Los datos crudos a partir de los cuales se hizo esta tesis fueron obtenidos de una base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Esta base de datos fue editada en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), con el patrocinio del SMN. Los datos fueron recopilados y organizados por la M. C. Gloria Herrera Vazquez, responsable del área de radio telecomunicaciones del SMN, quien fue reconstruyendo una base histórica homogénea. La coordinación de esta edición fue realizada por la M.C. Isabel Quintas del IMTA, quien tuvo a su cargo el diseño y organización de la base de datos, así como el procesamiento de los datos diarios y su presentación final.

Todos los datos contenidos en esta base fueron recopilados por medio de radiosonda. El SMN cuenta con solo 15 estaciones de medición de altura (las que lanzan radiosondas), de un total de 169 estaciones que operan al nivel del terreno. Estas 15 estaciones tienen diferente período de operación. Las primeras tres comenzaron a operar en 1948 y en 1995 se agregaron las dos últimas en Torreón y Cancún.

A continuación se encuentra la lista de estas estaciones. Cada una de ellas es reconocida internacionalmente por su número de clave que comienza con 76, correspondiente a México, seguido de tres dígitos correspondientes a la estación.

Tabla 1. Estaciones de medición de altura en la República Mexicana.

Clave OMM [‡]	Nombre	Inicio de operación	Latitud	Longitud	Altura
76679	Aeropuerto, DF	1948	19°26'	99°8'	2254.0**
76458	Mazatlán	1948	23°11'	106°25'	9.5
76644	Mérida	1948	20° 57'	89°39'	11.0
76692	Veracruz	1952	19°7'40"	96°7'35"	13.0
76225	Chihuahua	1964	28°38'	106°4'	351.0
76256	Empalme	1964	27°59'	110°46'	11.0
76394	Monterrey	1964	25°41'	100°18'	512.0
76151	Isla Guadalupe	1971	29°4'	110°58'	6.0
76723	Isla Socorro	1973	18°43'	110°57'	34.0
76654	Manzanillo	1976	19°4'	104°20'	3.4
76612	Guadalajara	1979	20°41'25"	103°23'7"	1551.0
76405	La Paz	1991	24°10'	110°18'	18.5
76805	Acapulco	1993	16°45'	99°46'	1
76382	Torreón	1995	25°34'	103°27'	1123.0
76595	Cancún	1995	21°10'	86°55'	10.0

[‡]Organización Meteorológica Mundial

**En marzo de 1998 se trasladó del aeropuerto del D.F. (2254 m s. n.m.) al SMN en Tacubaya (2305 m s. n. m.).



Figura 4. Estaciones de radiosondeo [Google Earth, 2010].

Esta base de datos se compone de tres series de datos diferentes. Las dos primeras se explican en el manual de los datos que proporcionó el SMN y la tercera base de datos se obtuvo directamente de la base de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

La primera serie se obtuvo de un CD-ROM del National Climatic Data Center, (NCDC), de Asheville, USA. Los datos cubren el periodo de 1948 a 1996. Dicha información fue recolectada de diversas fuentes, que incluyen a los datos conservados por National Climatic Data Center y el Global Telecommunication System, provenientes de los datos recibidos en Washington, D.C. en EE.UU. y de Moscú, en Rusia, respectivamente. Esta serie se completó con los datos de los años 1997 y 1998 que se encuentran en Internet, proveniente de los mismos centros. Los datos estaban en el formato específico de la base de datos climática USAFETAC y fueron decodificados y convertidos en archivos ASCII por el SMN en colaboración con el Colegio de Posgraduados.

La segunda serie, corresponde a los datos que el SMN viene almacenando de los sondeos recibidos en las oficinas centrales de Tacubaya, que a su vez retransmite al Centro Regional IV de Washington. Esta serie es muy importante porque incluye mucha información que no está registrada en la base regional del NCDC, por no llegar a tiempo o no ser enviada. En esta serie se registran además un mayor número de niveles, que luego el NCDC procesa para obtener sus registros. Se tiene información desde el año de 1989 (solo en parte) hasta 1998.

La tercera serie de datos a partir del año de 1998 y hasta el año 2017 se encontró en una base de datos digital en el sitio electrónico www.esrl.noaa.gov/raobs/. Se encontró que en este sitio ya están los datos para todas las estaciones de México y, en realidad, ya están los datos para todas las estaciones del mundo. A partir de esta base de datos se inició con el procesamiento.

3.2 Información dentro del archivo de datos

Las variables que mide el radiosondeo son la temperatura, la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa, la temperatura del punto de rocío y la presión. Todos estos valores están referidos a la altura a la cual se tomó la medición. Todos los archivos tiene el mismo formato ASCII organizados por columnas. Cada columna contiene la siguiente información:

- 1^a identificador de tipo de nivel
- 2^a presión en milibares
- 3^a altura geopotencial
- 4^a temperatura en décimas de grado centígrado
- 5^a temperatura de punto de rocío en décimas de grado centígrado
- 6^a dirección del viento en grados, de 1 a 360^o
- 7^a velocidad del viento en m/s

El identificador de la primera columna indica:

- 254 inicio de un sondeo, a continuación hora (Z), día, mes y año
- 1 xx, yy, latitud, longitud (en grados), altura de la estación (en metros)
- 2 unidades de velocidad (ms = m/s, ks = nudos), mm, na, nv
- 4 niveles obligatorios
- 5 niveles significativos de temperatura
- 6 niveles significativos de presión
- 7 tropopausa
- 8 velocidad máxima
- 9 nivel de superficie

A continuación, se muestra un ejemplo de archivo con los detalles antes mencionados. El valor 99999 en cualquier posición significa que no hay dato:

```

254 0 1 JAN 1980
1 22105 76151 28.87 118.25 23
2 ms 150 44 0
9 1016 23 174 131 330 40
4 1000 165 149 105 332 30
5 994 216 178 133 334 30
5 956 551 186 51 356 10
5 950 605 188 53 1 10
5 900 1067 167 12 344 40
5 870 1355 159 -77 359 50
4 850 1552 161 -75 5 50
5 800 2063 127 -103 21 20
5 750 2601 91 -133 33 20
4 700 3168 51 -166 180 30
5 614 4226 -12 -218 165 110
5 550 5092 -77 -272 218 170
4 400 7483 -267 -428 220 210
5 331 8820 -378 -409 223 250
5 319 9074 -392 -435 226 260
4 300 9493 -415 99999 231 300
4 250 10702 -523 99999 229 330
5 214 11687 -614 99999 231 370
4 200 12106 -624 99999 235 400
254 12 1 JAN 1980
1 22105 76151 28.87 118.2 23
2 ms 545 25 0
9 1014 23 171 156 330 30
4 1000 144 167 152 316 50
5 987 256 174 131 312 70
5 964 458 171 48 319 70
.....
5 545 5104 -109 -299 99999 99999
4 500 5761 -148 -332 99999 99999
5 450 6549 -211 -385 99999 99999

```

A.4 Procesamiento de los datos

4.1 Suposiciones generales

Se realizaron varios códigos computacionales para procesar la base de datos. Se utilizó este método pues la base de datos completa consiste de 15 estaciones, con dos mediciones diarias por estación, con 8 datos por medición y con 40 años de mediciones en promedio, para un total de quinientos millones de datos.

Aunque se procesaron todas las estaciones de radiosondeo del país, y estos datos posiblemente tengan alguna utilidad sobre todo en lo que respecta a los fenómenos de El Niño y La Niña, en esta tesis solamente se presenta el análisis correspondiente a dos estaciones: la de Tacubaya-Aeropuerto, en la Ciudad de México (19.4333, -99.1333, 2254 m s. n. m.) y la del puerto de Veracruz (19.1277, -96.1263, 13.0 m s. n. m.). En particular, la primera parte de esta tesis analiza los datos de temperatura en la atmósfera en estas dos estaciones. La razón es que la estación de Tacubaya-Aeropuerto es la más cercana a los volcanes Popocatepetl (19.0234, -98.6225, 5426 m s. n. m.) e Iztaccíhuatl (19.1776, -98.6414, 5230 m s. n. m.), de los cuales se quiere conocer el comportamiento de la temperatura atmosférica cercana a sus glaciares para comparar estos datos con los pocos que se tienen de los propios glaciares por otros métodos. En analogía, la estación de Veracruz es la más cercana al volcán Citlaltépetl (19.0303, -97.2683, 5636 m s. n. m.) y se quiere conocer este mismo comportamiento cerca del glaciar Jamapa del que también se conocen algunos otros datos obtenidos por otros métodos.

Para este trabajo, se supone que las distancias desde las estaciones hasta los volcanes son suficientemente cercanas como para que los resultados sean representativos de la zona y por lo tanto tengan validez. La distancia desde la estación Tacubaya-Aeropuerto al volcán Iztaccíhuatl es de 63 km, mientras que la distancia entre la estación de Veracruz y el volcán Citlaltépetl es de 122 km. Aunque hay efectos locales debido a los volcanes mismos, estos no se cuantificaron.



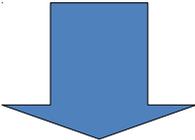
Figura 5. Distancias de las estaciones a sus glaciares más cercanos respectivos.

4.2 Modificación del formato de la base de datos

Se hizo un manual con las instrucciones para el procesamiento paso a paso que se puede encontrar en el apéndice A.1.

Primero, y debido al formato primigenio de los datos, se diseñó un código en C para cambiar este formato a uno más accesible. Esencialmente, este código cambia un archivo que en el primer renglón de la medición tiene la hora (en la segunda columna) y luego la fecha indicada como día (en la tercera columna), abreviatura alfabética del mes en inglés (en la cuarta columna), y año (en la quinta columna), por un archivo que contiene la fecha numéricamente con el formato *aaaammddhh* en todos los renglones de la primera columna.

254	3	25	JAN	1952			
1	11904	76692	19.18	96.12	12		
2	ms	32767		10	0		
9	1018	12	227	195	99999	99999	
4	1000	167	210	180	99999	99999	
5	950	610	199	160	99999	99999	
5	900	1077	186	143	99999	99999	
4	850	1566	153	121	99999	99999	
5	800	2077	116	67	99999	99999	
254	2	26	JAN	1952			
1	11904	76692	19.18	96.12	12		
2	ms	32767		21	0		
9	1014	12	240	211	99999	99999	
4	1000	133	232	200	99999	99999	
5	950	580	236	138	99999	99999	
5	900	1053	218	137	99999	99999	



195201253	9	1018	12	227	195	99999	99999
195201253	4	1000	167	210	180	99999	99999
195201253	5	950	610	199	160	99999	99999
195201253	5	900	1077	186	143	99999	99999
195201253	4	850	1566	153	121	99999	99999
195201253	5	800	2077	116	67	99999	99999
195201262	9	1014	12	240	211	99999	99999
195201262	4	1000	133	232	200	99999	99999
195201262	5	950	580	236	138	99999	99999
195201262	5	900	1053	218	137	99999	99999

Figura 6. Conversión del formato del archivo. Las negritas indican el cambio en la fecha.

Este código se puede encontrar en el apéndice A.2.

4.3 Temperaturas

Con estos datos procesados, se continuó a encontrar la altura a la cual se encuentra la temperatura 0 °C. El interés principal es saber si por encima de esta altura, los glaciares, teóricamente, se preservan, puesto que esta es la temperatura a la que se preserva el hielo en condiciones ideales. Si medimos el promedio de la altura de esta temperatura y lo comparamos

con la altura real a la cual se encuentra el glaciar podremos afirmar o negar la relación entre estas dos variables. Idealmente, la función de la temperatura debería ser una función continua en toda la atmósfera. En particular, debería ser diferenciable y lineal en la tropósfera (que es el rango que nos interesa). Además, se hace la suposición de que el cambio de temperatura con la altura es adiabático y que es constante. Con base en estas suposiciones se hará un cálculo de la altura a la cual se encuentra la temperatura 0 °C en la atmósfera. Para llevar a cabo este cálculo se realizó un segundo código en Octave (Matlab), el cual puede ser consultado en el apéndice A.3. A continuación se explica su funcionamiento.

Primero tenemos un archivo con unas columnas y miles de líneas. En la columna 4 se encuentra la altura de la medición en metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.), mientras que en la columna 5 se encuentra la temperatura de esa medición en décimas de grado. Nuestra intención es encontrar la altura a la que se encuentra la isoterma 0 °C, sin embargo las mediciones hechas por la radiosonda muy rara vez coinciden con la altura a la que se encuentra esta temperatura. Con las suposiciones ya mencionadas, se buscan dos parejas de números consecutivos de tal forma que la primera sea positiva en la temperatura y la segunda sea negativa. En el siguiente esquema se muestra un ejemplo de la pareja de números buscados, en el cual la temperatura positiva es de 1.4 °C (recordar que las temperaturas en el archivo original están en décimas de grado Celsius) correspondiente a una altura de 4314 m s. n. m. y la temperatura negativa es de -0.9 °C correspondiente a 4788 m s. n. m. En algún punto entre estos dos puntos medidos se encuentra el punto de interés 0.0 °C a una altura desconocida, precisamente la que queremos encontrar para nuestro análisis.

1997091912	5	670	3516	50	46	99999	99999
1997091912	6	659	3657	99999	99999	75	15
1997091912	5	644	3837	46	15	99999	99999
1997091912	6	634	3962	99999	99999	85	72
1997091912	6	611	4267	99999	99999	90	72
1997091912	5	607	4314	14	-18	99999	99999
1997091912	5	572	4788	-9	-89	99999	99999
1997091912	6	566	4876	99999	99999	85	72
1997091912	5	546	5157	-17	-177	99999	99999
1997091912	6	544	5181	99999	99999	80	77
1997091912	5	530	5392	-23	-113	99999	99999

Figura 7. Ejemplo de los datos buscados para un día específico.

Una vez que se encuentran estos dos pares de datos, se les hace un ajuste lineal (figura 8) para obtener la ecuación de la temperatura. Después se sustituye el valor de 0 °C en esta ecuación para obtener el valor de la temperatura a esta altura. Es decir, el valor de la altura a la temperatura 0 °C es la ordenada al origen de la ecuación obtenida a partir de los datos.

Para este análisis también se pudieron haber usado todos los datos correspondientes a la medición de un día y se pudo haber ajustado la recta por mínimos cuadrados, pero se decidió usar solamente dos pares de datos pues se pensó que proporcionarían un dato interpolado más cercano a las mediciones efectuadas por el radiosondeo. En la siguiente gráfica se muestran las diferencias en los valores de la altura con ambos métodos. En el primero, la altura de la isoterma es de 0 °C es de 4602 m s. n. m., mientras que por el segundo es de 4733 m s. n. m.

El esquema anterior presenta el caso ideal de los datos crudos, sin embargo la base de datos presenta muchos bemoles. Principalmente se encontraron 4 casos conflictivos:

- Problema: No hay datos. En el archivo aparece el número 99999 en lugar de la temperatura verdadera. Significa que el dato no existe.
 - Solución: El programa simplemente se salta esta medición y continúa con la siguiente.
- Problema: Solo hay temperaturas positivas (lo más común, pues la sonda se pudo descomponer antes de alcanzar la altitud de las temperaturas negativas) o solo hay temperaturas negativas (un poco más raro).
 - Solución: Se toman todos los datos para esa medición en particular y se ajusta una recta, después se extrapola al cero en la temperatura.
- Problema: Dos parejas o más de puntos cumplen con el supuesto original, pues siempre existe la probabilidad de que una masa de aire frío quede atrapada entre dos más calientes o viceversa.
 - Solución: Se toman todos los datos para esa medición en particular y se ajusta una recta, después se interpola al cero en la temperatura, es decir que se hace un tipo de promedio de las diversas parejas de puntos.
- Problema: Un caso no contemplado más raro que los anteriores.
 - Solución: El programa se detiene y arroja una alerta para que la persona que procesa los datos vaya a la base de datos y decida qué hacer. Si los datos son muy malos, simplemente se borran todos los datos correspondientes a esa única medición. Estos casos fueron muy pocos —menos de 10 mediciones de un aproximado de 40000— por lo que no representa una pérdida significativa de información.

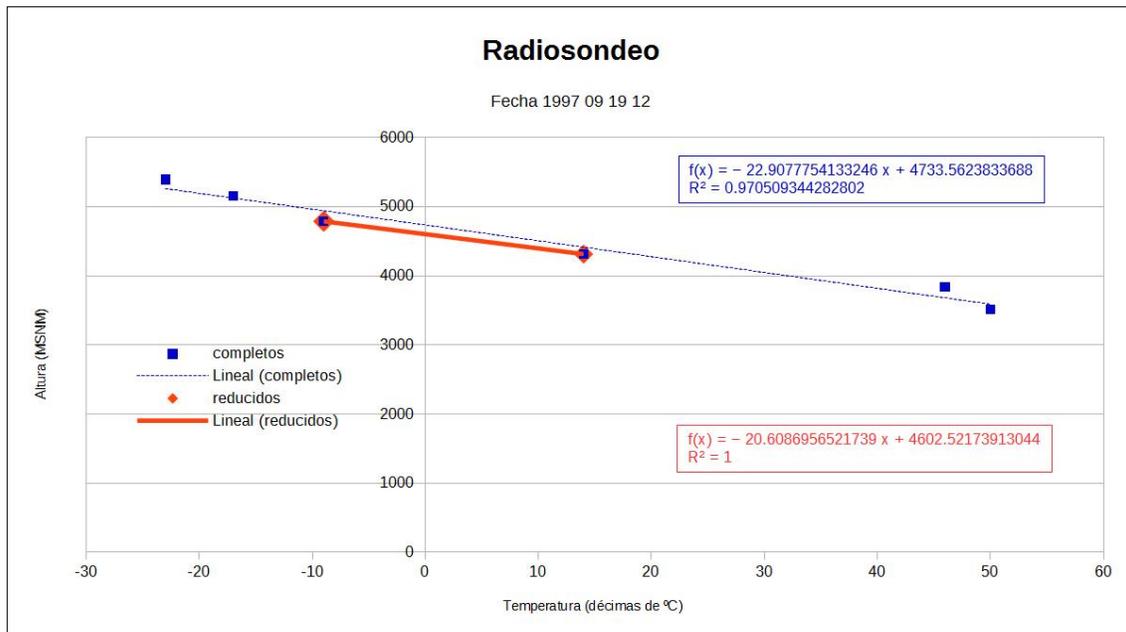


Figura 8. Ejemplo gráfico de radiosondeo.

Una vez que se hizo el programa y debido a todos los errores que podría contener, se probó el código calculando la temperatura de una base de datos de la que ya se había calculado su temperatura anteriormente (Pérez, 2010). Se presentan los resultados de la base de datos de la estación 679 Tacubaya-Aeropuerto con el método manual y con el código desarrollado para este trabajo.

Para comparar los datos se usó el MAPE (error porcentual absoluto medio) por sus siglas en inglés. EL MAPE tiene valores entre cero e infinito y en el que el valor más bajo representa un mejor ajuste de los datos.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{At - Ft}{At} \right| \quad (7)$$

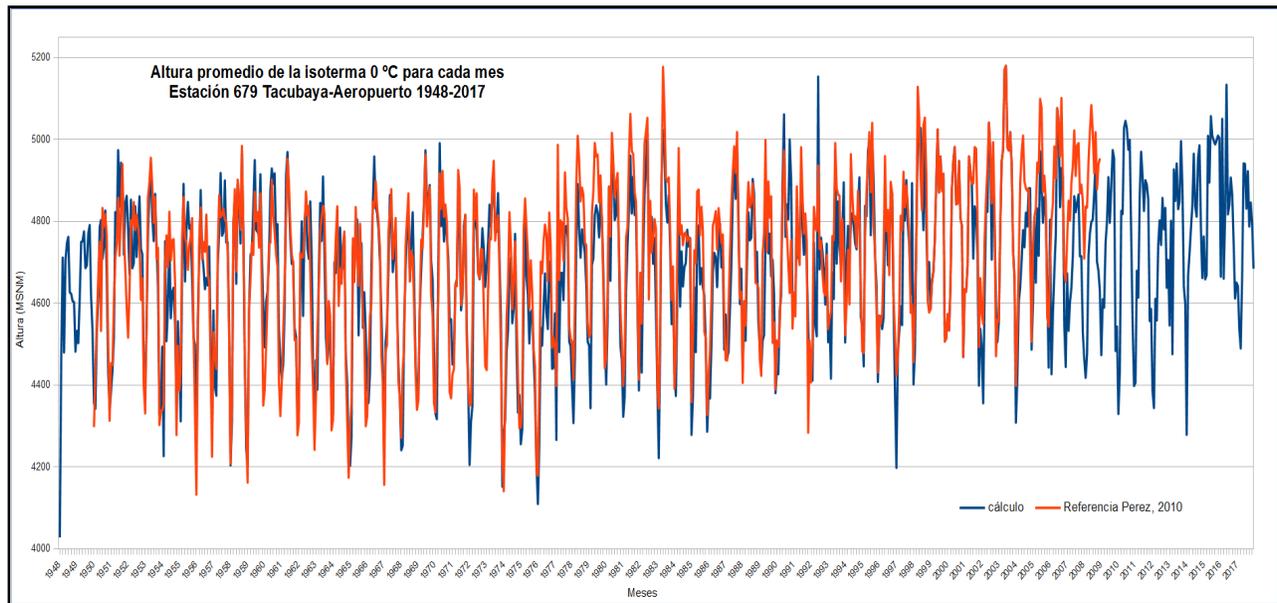


Figura 9. Comparación de los datos mensuales para la estación de la Ciudad de México. Los datos en azul son los procesados con el programa computacional que se escribió para este trabajo. Los datos en rojo son los reportados en la tesis de Perez, en 2010. El MAPE es de 0.016.

Una vez que se validó el programa con los valores de confianza que arroja el MAPE, se procedió a procesar la base de datos correspondiente a Veracruz para compararla con el retroceso del glaciar Jamapa. Estos resultados se presentaron en el Congreso Nacional de la Unión Geofísica Mexicana en 2010 [Téllez, 2010].

Una vez que se realizó el procesamiento de estas dos estaciones, se procesó por completo la base de datos de todo el país. En esta tesis solo se presentan los datos que corresponden a la estación de Veracruz y a la del Aeropuerto-Tacubaya.

También se hizo la comparación con los promedios anuales obtenidos en la tesis de Pérez que se muestran en la figura 10. Las diferencias son más grandes que en el caso de los promedios mensuales, sobre todo al final de la serie, pero en general con los promedios anuales se pierde mucha información por lo que es mejor usar los promedios mensuales.

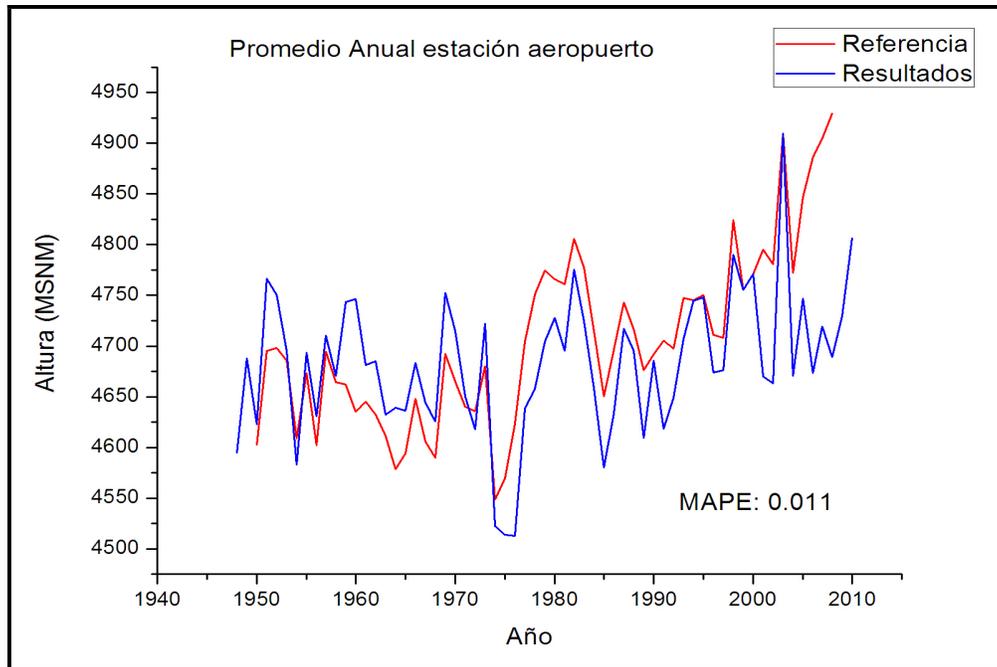


Figura 10. Comparación de los datos anuales para la estación de la Ciudad de México. La curva en azul es los datos procesados con el programa computacional.

4.4 Series de tiempo

Para hacer parte del análisis se usó el método de las series de tiempo. Una serie de tiempo es una sucesión de observaciones que están acomodadas de acuerdo al momento de su medición. Por ejemplo, en agricultura se registra la cantidad de cosecha anual de maíz y su precio por tonelada. La sección de negocios de los periódicos reporta diariamente los precios de la bolsa de valores, las tasas de interés semanal, tasas mensuales de desempleo y el volumen de ventas anual. Los reportes meteorológicos tienen la velocidad del viento cada hora, temperaturas máximas y mínimas y cantidad de lluvia anual.

La propiedad característica de una serie de tiempo es el hecho de que los datos no se generan independientemente, su dispersión varía con el tiempo, a menudo tienen una tendencia y componentes cíclicos. Los procedimientos estadísticos que suponen datos independientes e idénticamente distribuidos están, por tanto, excluidos del análisis de las series de tiempo. Una serie de tiempo es una sucesión de una variable. El análisis de las series de tiempo da herramientas para seleccionar un modelo que puede ser usado para pronosticar eventos futuros.

4.4.1 Componentes

Supondremos que en una serie existen cuatro tipos básicos de variación, los cuales, sobrepuestos o actuando en conjunto, contribuyen a los cambios observados en un periodo de tiempo y dan a la serie su aspecto errático. Estas cuatro componentes son tendencia secular, variación

estacional, variación cíclica y variación irregular. Además se puede suponer que existe una relación multiplicativa entre estas cuatro componentes es decir, cualquier valor de una serie es el producto de factores que se pueden atribuir a las cuatro componentes. O, igualmente, se puede suponer que la relación entre las variables es aditiva, es decir que el valor de una serie es la suma de factores que se pueden atribuir a las cuatro componentes.

Tendencia secular

La tendencia secular o simplemente tendencia de una serie es por lo general, el resultado de factores a largo plazo. La tendencia de una serie de tiempo caracteriza el patrón gradual y consistente de las variaciones de la propia serie, que se consideran consecuencias de fuerzas persistentes que afectan el crecimiento o la reducción de la misma. Las tendencias a largo plazo se ajustan a diversos esquemas, algunas se mueven continuamente hacia arriba, otras declinan y otras más permanecen en un cierto periodo o intervalo de tiempo. En una gran mayoría de fenómenos con frecuencia se usa la aproximación lineal. El método que se utiliza para obtener la línea recta de mejor ajuste es el método de mínimos cuadrados. Cuando la serie de tiempo presenta un comportamiento curvilíneo se dice que este comportamiento no es lineal. Dentro de las tendencias no lineales que pueden presentarse se encuentran polinomial, logarítmica, exponencial, potencial, entre otras.

Variación estacional

El componente de la serie de tiempo que representa variabilidad en los datos debida a influencias de las estaciones, se llama componente estacional. Esta variación corresponde a los movimientos de la serie que recurringen año tras año en los mismos meses del año (o en los mismos trimestres o cuatrimestres, etc.), más o menos con la misma intensidad.

Existen diversos métodos para incorporar la variación estacional. Uno de ellos es el del promedio móvil, que es básicamente una forma de incorporar el promedio de cada mes (o cada estación) a la tendencia de la serie. La ecuación (8) aplicada a cada mes produce el perfil estacional que refleja esta variación.

$$Promedio\ mes_i = \frac{\sum_1^n Todos\ los\ meses_i}{n} \quad (8)$$

Para incorporar la variación estacional a la tendencia, primero se realiza un promedio móvil. Esto es, para el dato $n+1$ se toma el promedio de los n meses anteriores y esto se hace para cada dato, excepto para los primeros n datos. En el caso de la variación mensual n es igual a 12.

$$Promedio\ móvil_i = \frac{\sum_{i-n}^{i-1} dato_i}{n} \quad (9)$$

Después se hace el siguiente cociente también para todos los datos.

$$Razón\ móvil_i = \frac{dato\ real_i}{promedio\ móvil_i} \quad (10)$$

En seguida se hace el promedio de la razón móvil para cada mes.

$$\text{Índice estacional para cada mes} = \frac{\sum \text{Razón móvil para cada mes}}{n - 12} \quad (11)$$

De donde se deberían obtener 12 índices estacionales, uno para cada mes. Finalmente, se usa el índice estacional multiplicado por la tendencia lineal de la serie para obtener el modelo estacionalizado.

$$\text{Modelo estacionalizado} = (mx_n + b) \left(\frac{\text{Índice estacional para cada mes}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^{12} \text{Índice estacional para cada mes}}{12} \right)} \right) \quad (12)$$

Donde n va desde 1 hasta el total de los datos.

Variación cíclica

Con frecuencia las series de tiempo presentan secuencias alternas de puntos abajo y arriba de la línea de tendencia que duran más de un año. Esta variación se mantiene después de que se han eliminado las variaciones o tendencias estacional o irregular. Por ejemplo, para este trabajo, la variación cíclica es la que podría introducir el fenómeno de El Niño.

Variación irregular

Esta se debe a factores a corto plazo, imprevisibles y no recurrentes que afectan a la serie de tiempo. Como este componente explica la variabilidad aleatoria de la serie, es impredecible, es decir, no se puede esperar predecir su impacto sobre la serie de tiempo. Existen dos tipos de variación irregular: a) Las variaciones que son provocadas por acontecimientos especiales, fácilmente identificables, como las elecciones, inundaciones, huelgas, terremotos. b) Las variaciones aleatorias o por casualidad, cuyas causas no se pueden señalar en forma exacta, pero que tienen a equilibrarse a la larga.

4.5 Análisis espectral

4.5.1 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una función integral de variable compleja que descompone una función que depende del tiempo en frecuencias continuas (no discretas) que la componen.

La transformada de Fourier tiene la siguiente forma:

$$\hat{f}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-2\pi i t w} dt \quad w \in \mathbb{R} \quad (13)$$

en donde t es el tiempo y w la frecuencia.

Para datos discretos se usa la transformada de Fourier discreta.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi k \frac{n}{N}} \quad k=0, \dots, N-1 \quad . \quad (14)$$

En donde k es un entero en unidades de ciclos/muestra, x_n es el conjunto de datos y N el total de datos

4.5.2 Transformada de Fourier aplicada a la desestacionalización de la serie de tiempo

Existen series de tiempo en las que la estacionalidad es desconocida y además es complicado observarla a partir de los datos. Es aquí donde se usa la transformada de Fourier para encontrar una o varias periodicidades.

Por ejemplo, aquí está la transformada de Fourier de la serie de datos de la altura de la isoterma 0 °C, la cual tiene una estacionalidad apreciable y ya conocida de 12 meses. Si se le aplica la transformada de Fourier a cualquiera de las curvas de la gráfica 9 de la sección 4.3 obtendremos la gráfica de la figura 11. El pico principal (en 0.0833 sobre el eje x) representa el periodo de 12 meses, el segundo pico (en 0.1666) corresponde a un periodo de 6 meses y el tercer pico (en 0.3333) corresponde a un periodo de 3 meses. En realidad, el pico principal se encuentra en el primer dato de la gráfica (0.0011), pero este pico solo significa que el total de mediciones es un ciclo completo, pues las mediciones comienzan en enero de 1948 y terminan en diciembre de 2017. Se eliminó este pico de la gráfica para visualizar mejor los otros.

En este ejemplo, está un tanto de más usar la transformada de Fourier para encontrar la estacionalidad principal, puesto que ya se sabía de antemano la estacionalidad de los datos anuales. Sin embargo, hay series de datos en las que es complicado saber si existe una periodicidad principal o alguna otra secundaria que tuviera relevancia para el modelado estacional o cíclico.

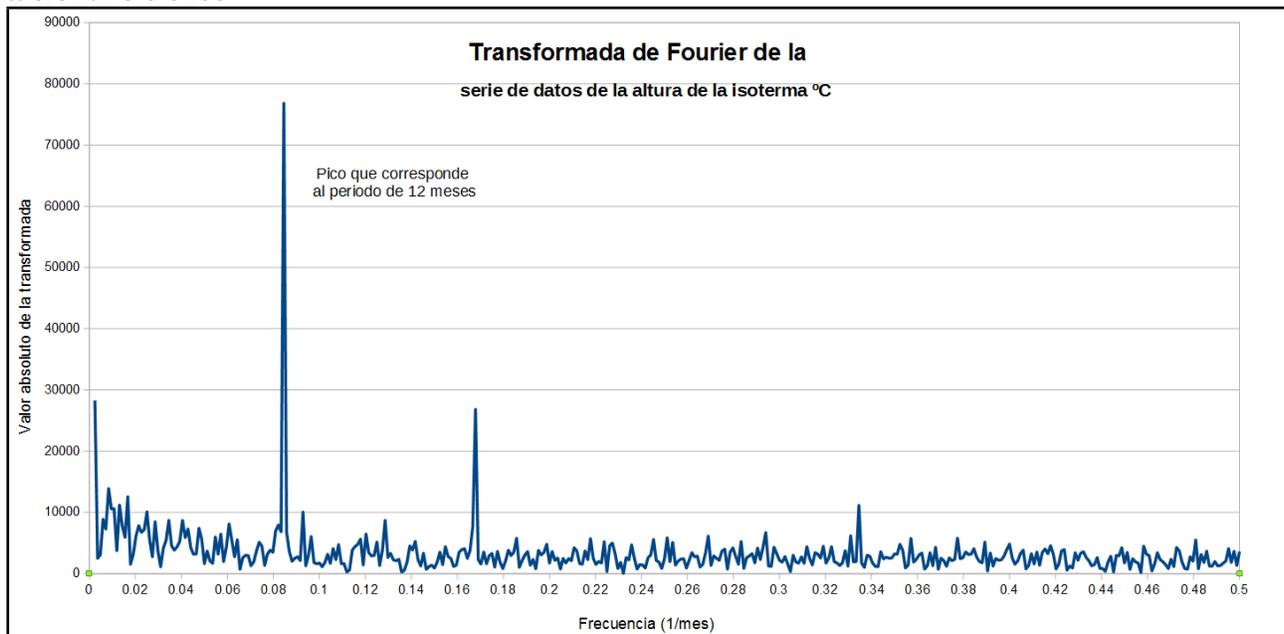


Figura 11. Transformada de Fourier de los datos de la altura de la isoterma 0 °C de la estación Tacubaya-Aeropuerto.

Para mejorar el modelo de desestacionalización de la serie, se usaron los datos de la Oscilación Meridional El Niño (ENSO) [NOAA-ESRL, 2018] y se les aplicó una transformada de Fourier usando Matlab. En este caso, por la naturaleza discreta y finita de los datos, se utilizó una transformada de Fourier discreta. Esta función arrojó varias posibles estacionalidades asociadas a la serie de datos. Se tomaron 9 periodicidades: 17, 25, 28, 33, 36, 41, 55, 63 y 117 meses. Se hicieron los cálculos con cada una de ellas por separado y se tomó la que tuvo el error más pequeño, aunque casi todas estas periodicidades tienen un error comparable entre ellas. Se dejaron fuera los cálculos debidos a la combinación de dos o más de estas periodicidades, puesto que el total de combinaciones posibles es de 511. Además, se comparó el modelo aditivo de la serie con el modelo multiplicativo, lo que dobló la cantidad de datos. De esta forma, el modelo de desestacionalización se refinó de forma significativa, pues los datos del modelo se parecen más a los datos reales.

A.5. Resultados

5.1 Resumen de los resultados

Se muestran los promedios mensuales para cada mes de la estación Tacubaya-Aeropuerto y así también los de la estación Veracruz. Ambas bases de datos muestran una tendencia ascendente en el total de sus respectivos periodos. El caso de Tacubaya es ligeramente más pronunciado que el de Veracruz. Como primera aproximación, se muestra la pendiente de la recta que mejor ajusta estos datos. Después, se compararon estos datos con las alturas de los glaciares más cercanos a cada una de las estaciones respectivas. Se puede apreciar una relación entre ambos conjuntos de datos, por lo que se puede hacer un pronóstico usando esta suposición. Se hizo un modelo de segunda aproximación mediante la desestacionalización de ambas series de datos y se hizo modelo predictivo con estacionalidad anual, es decir, con un perfil anual de las temperaturas. Coincide suficientemente bien, sin embargo, es claro que no se están tomando en cuenta factores climáticos de más largo periodo como es la Oscilación Meridional El Niño (ENSO). Para tomar en cuenta este factor se refinó el modelo predictivo y se incorporó la periodicidad producida por ENSO. Para esto, se buscaron sus periodicidades con una transformada de Fourier y se modeló con todas por separado, aunque solamente se reporta la que arrojó el menor error en comparación con los datos experimentales. Con este último modelo se muestra un pronóstico de desaparición de los glaciares si la tendencia continúa como hasta ahora.

5.2. Altura mensual promedio de la isoterma 0 °C y tendencia con aproximación lineal

5.2.1 Estación de Tacubaya-Aeropuerto

La siguiente gráfica muestra los datos mensuales la estación Tacubaya-Aeropuerto obtenidos, además de un ajuste lineal de esta gráfica. Se puede apreciar una tendencia ascendente en la altura de la isoterma 0 °C.

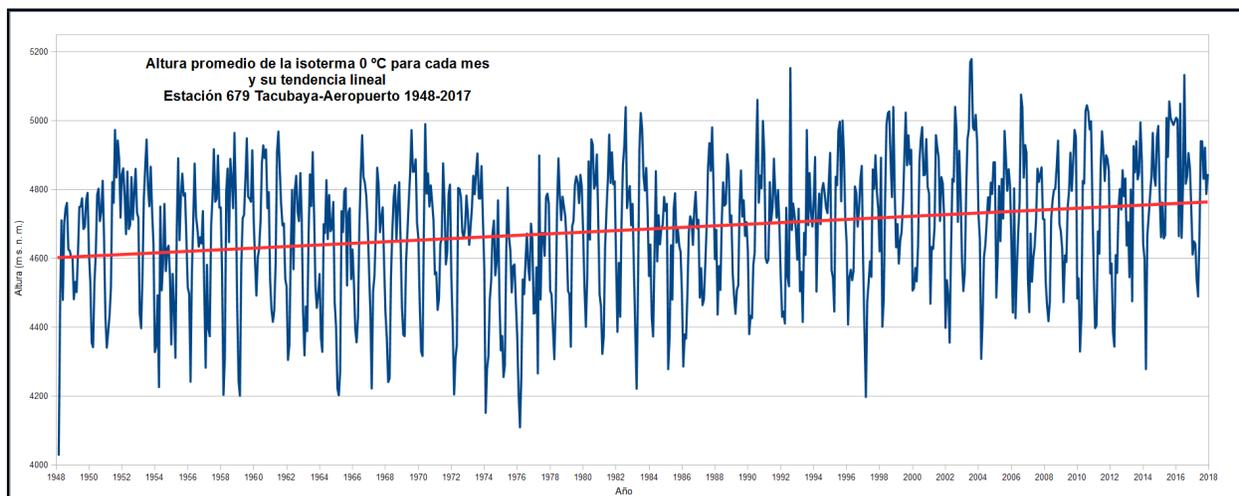


Figura 12. Altura promedio de la isoterma 0 °C para cada mes y su tendencia lineal para la estación 679 Tacubaya-Aeropuerto desde enero de 1948 hasta diciembre de 2017.

Ordenada al origen: 4602 ± 9.161 m s. n. m.
Pendiente: 0.1926 ± 0.0210 m s. n. m./mes
 R^2 : 0.0586

En 1948 la altura promedio fue de 4602 m s. n. m., mientras que en 2017 fue de 4761. Si sabemos que cada 180 metros en el cambio de la altitud representa un cambio de 1°C , podemos decir que la temperatura en el Valle de México ha subido 0.9°C desde mediados del siglo pasado.

5.2.2 Estación de Veracruz

Aquí se presenta el promedio de la altura de la temperatura 0°C desde 1952 hasta 2017 usando la estación de Veracruz localizada exactamente en $19^\circ 7' 40''\text{N}$, $96^\circ 7' 35''\text{W}$, 13.0 m s. n. m. Los datos de esta estación tienen una tendencia es menor que para la anterior, pero también es ascendente.

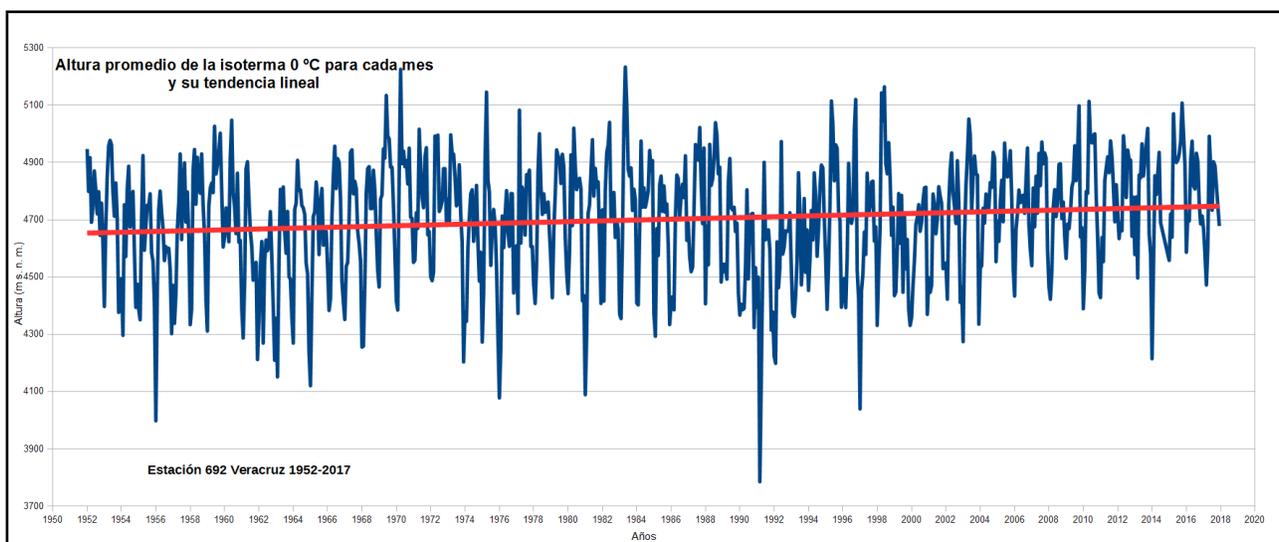


Figura 13. Gráfica de la estación Veracruz

Ordenada: 4653 ± 26.59 m s. n. m.
Pendiente: 0.1190 ± 0.0631 m s. n. m./mes
 R^2 : 0.01724

En el año de 1952 la altura promedio fue de 4653 m s.n.m., mientras que en 2017 fue de 4745. Si sabemos que cada 180 metros en el cambio de la altitud representa un cambio de 1°C , podemos decir que la temperatura en Veracruz ha subido 0.5°C desde mediados del siglo pasado. Consecuentemente, con los supuestos que tomamos, podemos decir que la temperatura en el volcán ha aumentado en esta misma medida.

5.2.3 Comparación entre altura de la isoterma 0°C y la de los glaciares

En la siguiente gráfica se puede ver la misma serie de datos mensuales que la gráfica 12, pero esta vez está comparada contra la altura de la línea de equilibrio del glaciar [Cortés, 2009]. El glaciar promedia en cierta medida la temperatura de la atmósfera hasta que desapareció debido a las erupciones del volcán.

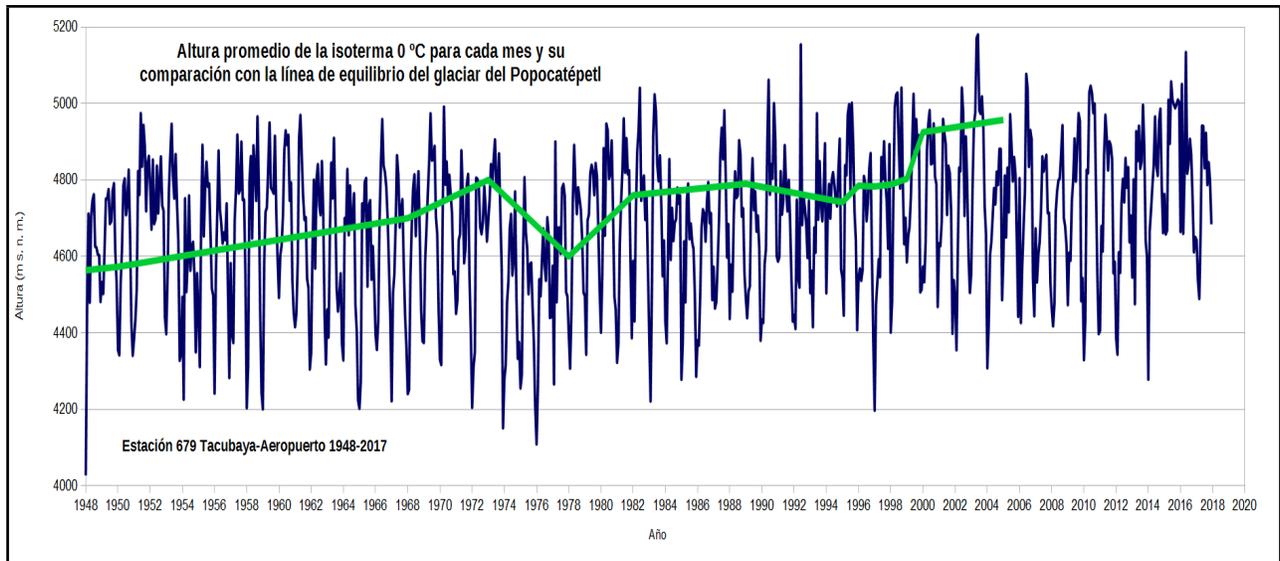


Figura 14. Comparación entre altura del glaciar del Popocatepetl y altura mensual de la isoterma 0 °C.

A continuación se presenta la misma serie de datos que la figura 13 comparada con la altura del glaciar Jamapa reportada por Cortés en 2009.

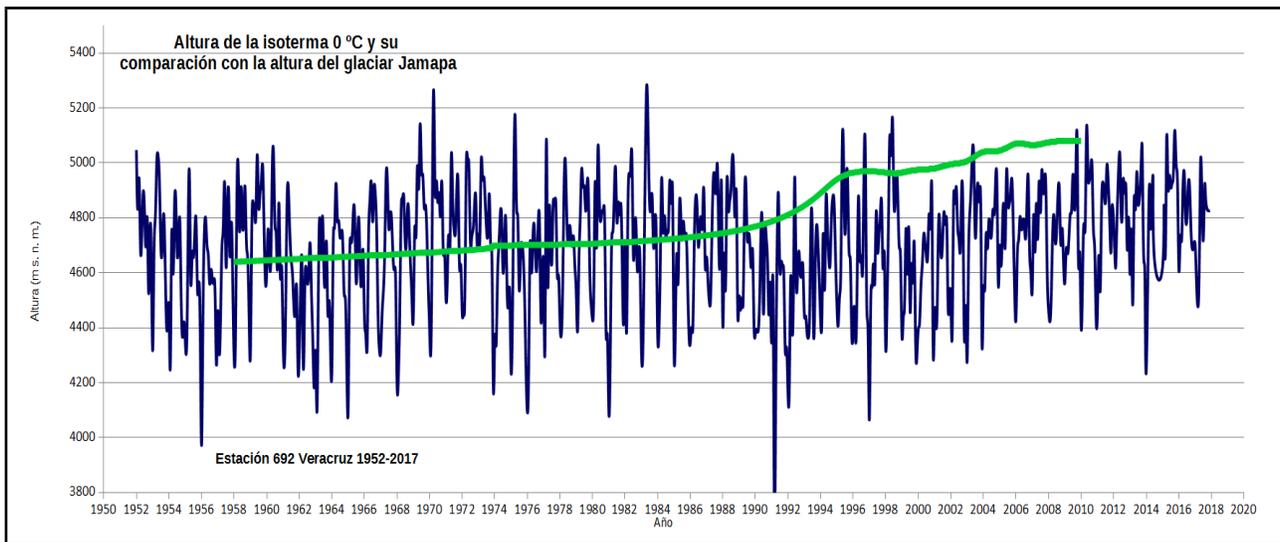


Figura 15. Gráfica del promedio mensual contra altura del glaciar.

En la gráfica se puede apreciar que el glaciar promedia de cierta forma y durante varios años la variación estacional de la temperatura, aunque ocurre algo extraño al principio de la década de los noventa. Para saber esto es importante tomar en cuenta más factores, sobre todo la precipitación en cada estación. También hay otros factores, como la radiación, la humedad del aire, la presión de vapor, en general las variables de estado.

5.3 Modelo con desestacionalización anual

5.3.1 Perfil anual de temperaturas

A lo largo del año, podemos ver una tendencia cíclica que se repite más o menos regularmente en la que los meses más fríos tienen una altura más baja y los meses más calurosos tienen una altura más alta. También vemos que el mes con más lluvias tiene una ligera baja en la altitud con respecto de otros meses. Este perfil, que se obtiene con la ecuación (8) sirve como base para hacer un pronóstico estacional anual, más precisamente con un periodo de 12 meses.

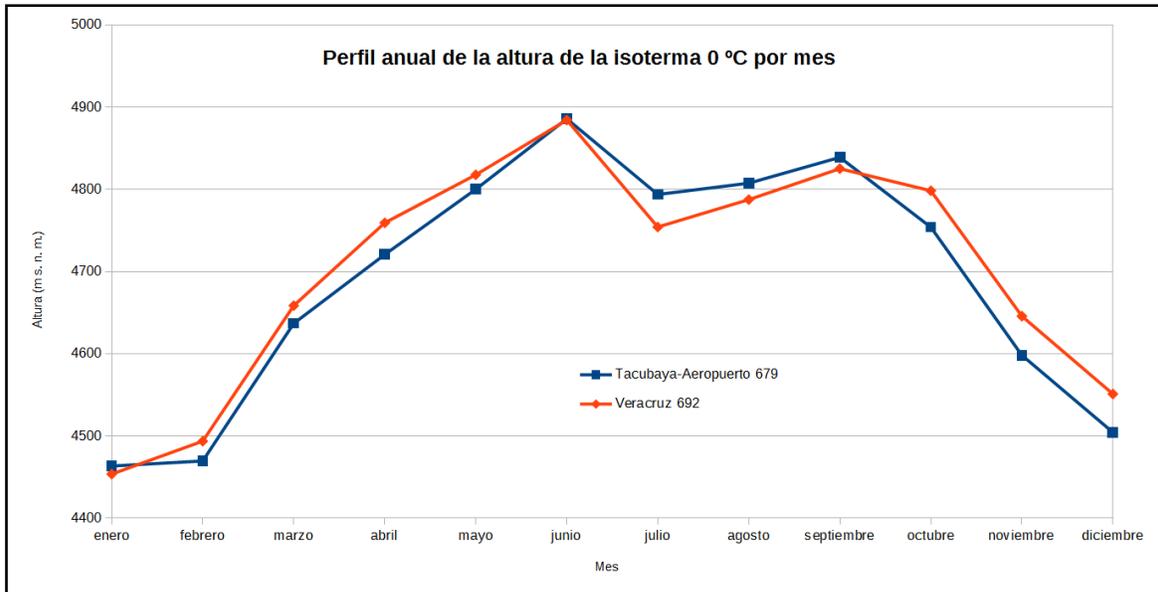


Figura 16. Gráfica del perfil anual de temperatura para cada estación. Esta gráfica es la base del modelo estacional.

Una vez que se tiene este perfil, se incorporará a la recta de tendencia en la forma de una serie de tiempo multiplicativa, como se explicó en la sección 4.4.

5.3.2 Estación de Tacubaya-Aeropuerto

En estas gráficas podemos ver la comparación entre los datos y el modelo con estacionalidad anual. El aumento en la altura entre cada año tiene una tendencia dada por la pendiente de la recta de la sección 5.2 y esta estacionalidad está dada por las ecuaciones de la sección 4.4.

Se muestran solo algunos años para que se note la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas con el paso del tiempo. La última curva es solo un pronóstico para junio de 2129, mes en que la isoterma 0 °C se encontraría a 5230 m s. n. m. que es la altura del Iztaccíhuatl. Esta es la altura reportada por el Smithsonian Institution en 2018, sin embargo un grupo de alpinistas mexicanos subieron a medir la cima en octubre de 2018 y esta altura podría cambiar.

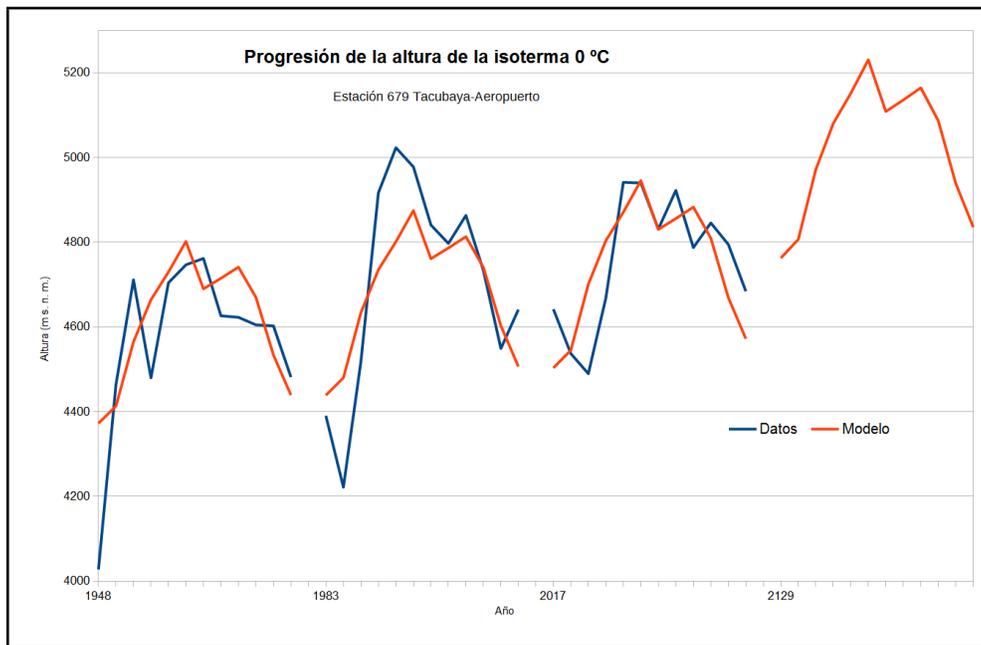


Figura 17. Estación Tacubaya-Aeropuerto con desestacionalización.

5.3.3 Estación de Veracruz

En la gráfica siguiente se aprecia un aumento de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura. Es posible que el efecto de la humedad en la costa disminuya las temperaturas extremas. Se muestra un pronóstico para junio de 2150. Con este modelo, la altura de la isoterma se encontraría a 5230 m s. n. m. El glaciar Jamapa se levanta hasta 5670 m s. n. m., pero se puso la misma altura del glaciar del Iztaccíhuatl como comparación de las diferencias que arroja la tendencia lineal para ambas estaciones.

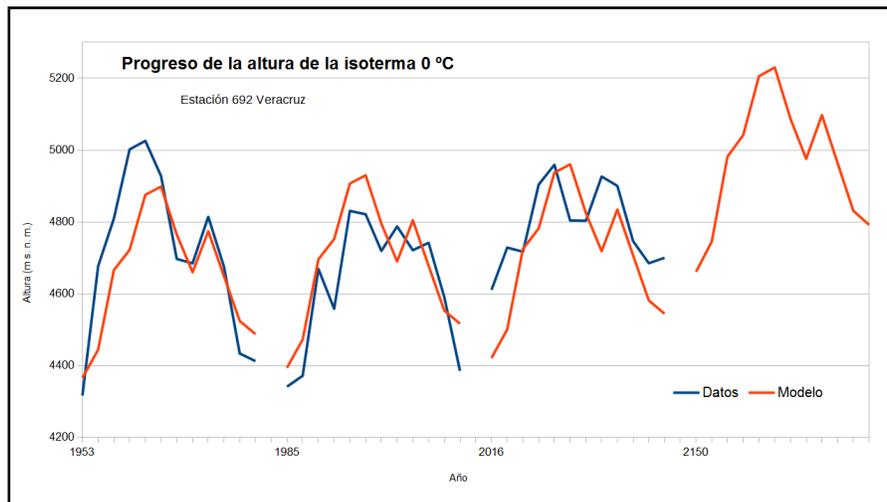


Figura 18. Gráfica de la estación Veracruz con desestacionalización.

Los resultados de esta sección (5.3) ya se presentaron en el 3.er Congreso de Cambio Climático del PINCC-UNAM en 2013 [Téllez, 2013].

5.4 Modelo con desestacionalización de periodicidad de ENSO

5.4.1 Periodicidad de ENSO

La serie de datos Niño-Niña que reporta la NOAA se ve de la siguiente forma. En rojo los fenómenos de El Niño y en azul los fenómenos de La Niña.

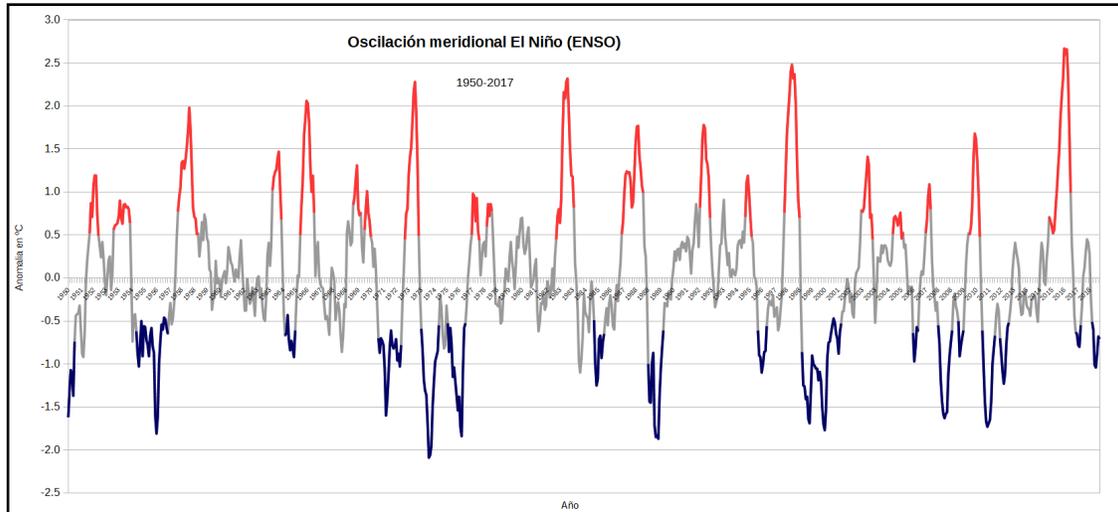


Figura 19. ENSO. Si la temperatura es mayor o menor a 0.5 °C de la temperatura media del océano durante 5 meses o más, se considera que hay fenómeno del Niño o la Niña respectivamente [NOAA-NWS, 2018].

Después de realizar una transformada de Fourier a la serie de datos se obtuvieron periodicidades de 17, 25, 27, 33, 36, 41, 55, 63 y 117 meses.

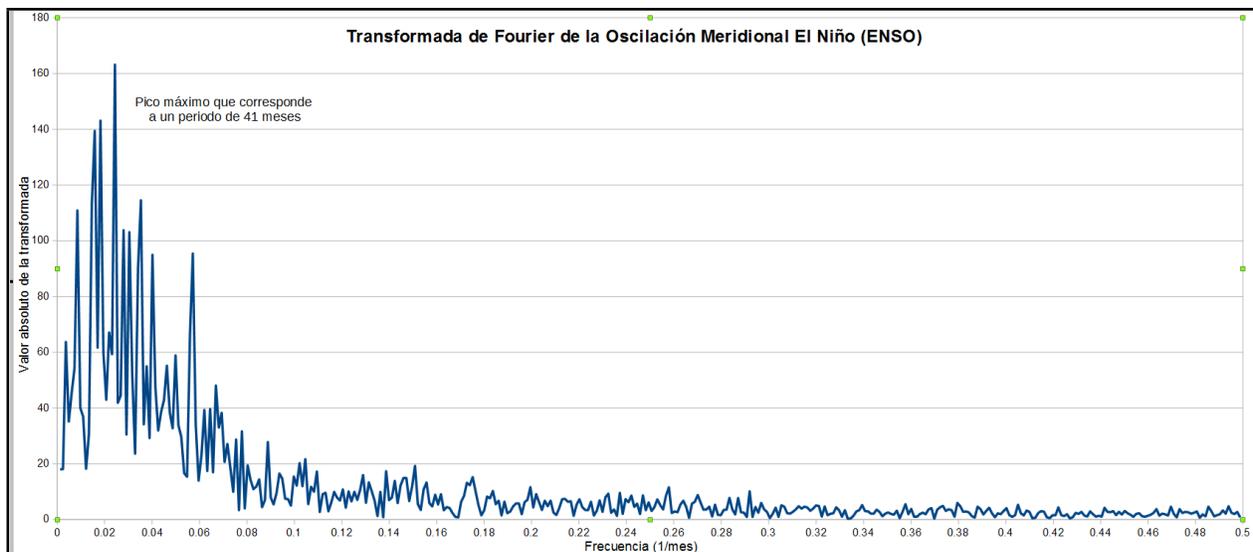


Figura 20. Transformada de Fourier de la serie de la Oscilación Meridional El Niño.

Se hicieron los modelos de desestacionalización incorporando estas periodicidades cada una por separado tanto de forma aditiva como multiplicativa a la periodicidad estacional anual. Se comparó el error arrojado por todos los 18 modelos y se reporta el que tiene menor error, aunque la diferencia del error entre modelos es en algunos casos muy poco representativa.

5.4.2 Estación de Tacubaya-Aeropuerto

El periodo que arrojó el menor error comparado con la serie de datos experimentales es la de 63 meses, que corresponde a 5 años y 3 meses.

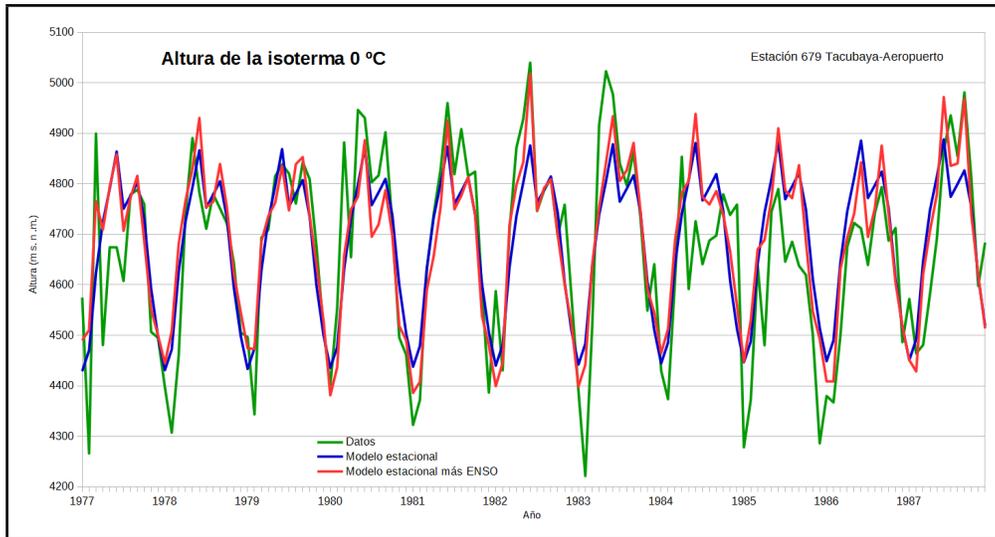


Figura 21. Se puede apreciar que el modelo estacional tiene el mismo perfil anual y solo aumenta un poco su altura, mientras que el modelo Niño-Niña sí varía en la forma de su perfil anual.

5.4.3 Estación de Veracruz

Se muestra en la gráfica 22 la comparación de los datos con el modelo estacional

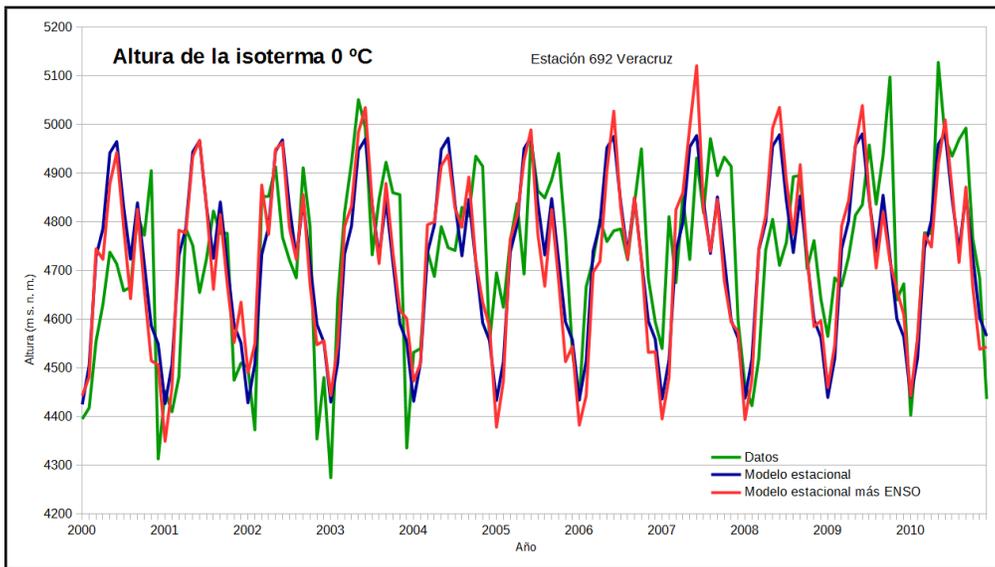


Figura 22. Gráfica de la comparación de los datos con el modelo estacional y con el modelo estacional más Niño-Niña. Se puede apreciar que el segundo modelo se acopla mejor a algunos picos.

5.5 Comparación entre los pronósticos del modelo estacional anual y el modelo estacional con ENSO

A este ritmo, para la estación de Tacubaya, en junio del 2129 tendremos una altura promedio de 5230 metros por lo que es de esperar que en ese año no haya glaciación. Sin embargo, este modelo solo toma en cuenta la estacionalidad anual teórica del aumento de la temperatura.

Tabla 2. Pronóstico de la altura media de la isoterma 0 °C para cada mes del año 2129 con el modelo de desestacionalización anual para la estación 679 Tacubaya-Aeropuerto. En negritas se muestra la altura justo por encima de la cima del volcán Iztaccíhuatl. A esta altura ya no existiría el glaciación.

Mes	Altura
enero	4762
febrero	4806
marzo	4972
abril	5080
mayo	5151
junio	5230
julio	5108
agosto	5135
septiembre	5164
octubre	5086
noviembre	4938
diciembre	4835

Tabla 3. Pronóstico de la altura media de la isoterma 0 °C para cada mes del año 2066 con el modelo de desestacionalización anual más ENSO para la estación 679 Tacubaya-Aeropuerto. En negritas se muestra la altura justo por encima de la cima del volcán Iztaccíhuatl. A esta altura ya no existiría el glaciación.

Mes	Altura
enero	4582
febrero	4630
marzo	4914
abril	4997
mayo	5044
junio	5227
julio	4944

agosto	4990
septiembre	5009
octubre	4893
noviembre	4791
diciembre	4709

La diferencia entre ambos modelos de derretimiento glaciario es de 63 años. El primer modelo parece muy optimista por las mediciones *in situ* y es posible que el segundo modelo, el que incorpora las estacionalidades de ENSO sea una mejor aproximación.

El MAPE para el primer modelo es de 2.13 % mientras que para el segundo modelo es de 2.06 %. La diferencia en el error de la serie de tiempo no es significativa, pero el tiempo de diferencia para que la isoterma rebasa la misma cota de altitud sí es grande.

Tabla 4. Pronóstico de la altura media de la isoterma 0 °C para cada mes del año 2150 con el modelo de desestacionalización anual para la estación 692 Veracruz. En negritas se encuentra la altura de la cima del volcán Iztaccíhuatl solamente como referencia con la estación anterior, aunque el glaciario del Citlaltépetl llega hasta los 5646 m s. n. m.

Mes	Altura
enero	4661
febrero	4745
marzo	4981
abril	5042
mayo	5205
junio	5230
julio	5087
agosto	4975
septiembre	5097
octubre	4963
noviembre	4831
diciembre	4792

Tabla 5. Pronóstico de la altura media de la isoterma 0 °C para cada mes del año 2070 con el modelo de desestacionalización anual más ENSO para la estación 692 Veracruz. Resaltada se encuentra la altura de la cima del volcán Iztaccíhuatl solamente como referencia con la estación anterior, aunque el glaciar del Citlaltépetl llega hasta los 5646 m s. n. m.

Mes	Altura
enero	4493
febrero	4580
marzo	4933
abril	4968
mayo	5107
junio	5235
julio	4934
agosto	4845
septiembre	4954
octubre	4784
noviembre	4696
diciembre	4676

La diferencia entre ambos modelos de derretimiento glaciar es de 70 años. El primer modelo parece muy optimista por las mediciones *in situ* y es posible que el segundo modelo sea una mejor aproximación.

El MAPE para el primer modelo es de 2.72 %, mientras que para el segundo modelo es de 2.66 %. La diferencia en el error de la serie de tiempo no es significativa, pero el tiempo de diferencia para que la isoterma rebase la misma cota de altitud sí es grande.

Después de incorporar la estacionalidad debida a los fenómenos de El Niño y La Niña a la estacionalidad anual simple se obtuvo un modelo que reduce el tiempo de vida de los glaciares del Iztaccíhuatl en 63 años. Para junio de 2066 la altura de la isoterma 0 °C podría estar en 5226 metros, que es la altura del volcán Iztaccíhuatl. Lamentablemente (para la vida del glaciar) este último modelo se acopla mejor a lo observado en campo.

El pronóstico del tiempo de vida del glaciar del Citlaltépetl también es menos optimista si se incorporan las estacionalidades de El Niño y La Niña.

A.6 Conclusiones

- Los programas computacionales que se realizaron fueron una buena herramienta para procesar la base de datos. Hay diferencias estadísticas que son despreciables si se toma en cuenta que se procesa el mismo volumen de datos en un menor tiempo.
- Tanto la base de datos de la estación Tacubaya-Aeropuerto como la de Veracruz, muestran una tendencia ascendente. El caso de Tacubaya-Aeropuerto es ligeramente más pronunciado que el de Veracruz. Esto evidencia el calentamiento de la atmósfera y también hace cuestionar el papel de las ciudades en estos procesos.
- La temperatura de la atmósfera sobre el valle de México ha aumentado en los últimos 70 años. El aumento desde 1948 hasta 2017 es de 0.9 °C. Este aumento es consistente (aunque no igual) con lo reportado con Sánchez-Lugo et al. (2011) que reportan un aumento de 0.85 °C de 1960 a 2010. Se puede decir que la temperatura de la atmósfera en las cercanías del parque Izta-Popo ha aumentado en esta misma forma.
- Aunque la estación de Veracruz tiene factores geográficos que ayudan a la estabilización del clima, también se aprecia que la temperatura ha aumentado en los últimos 70 años. El aumento de la temperatura en esa estación desde 1952 hasta 2017 ha sido de 0.5 °C.
- Parece haber una relación entre la línea de equilibrio de los glaciares y la isoterma 0 °C, sin embargo, para concluir esto se necesitaría un análisis adicional de variables como la humedad o la irradiancia, puesto que el balance de masa del glaciar se compone de evaporación-precipitación: la evaporación tendría una relación más estrecha con la irradiancia y la precipitación con la humedad.
- Esta relación parece ser un promedio pesado en el que cada mes contribuye de manera diferente. El mes de junio es el que presenta la mayor temperatura promedio a lo largo del año, de hecho es el mes en el que el Sol está más tiempo en el cenit, sin embargo también tiene precipitación por lo que sin un análisis de precipitación, es complicado saber en cuál mes hay mayor derretimiento y mayor ganancia de masa.
- El glaciar es un sistema que no es tan elástico como la atmósfera, es decir, se recupera menos rápido de los cambios abruptos. La atmósfera cambia día con día, y aunque el glaciar lo haga también, estas diferencias son menos notables.
- Es posible que la distancia entre el punto en el que están tomados los datos y el glaciar influya en la precisión de las comparaciones entre las medidas.
- La serie de tiempo desestacionalizada con una primera aproximación al ciclo regular anual, arroja un pronóstico que parece no ser real de acuerdo a las observaciones actuales.
- Una segunda desestacionalización en la que se incorpora la contribución debida a la Oscilación Meridional El Niño (ENSO) se aproxima mejor a las observaciones.

- El ENSO podría tener un papel importante en el derretimiento y también en la acumulación de materia en el glaciar. Es importante tomar en cuenta estos periodos no anuales para modelar el clima y sus efectos en fenómenos físicos geográficos particulares.
- Si la tendencia actual se mantiene, de acuerdo al modelo predictivo de la desestacionalización con ENSO, el glaciar del pecho del Iztaccíhuatl podría desaparecer definitivamente para junio del año 2066.
- Si la tendencia actual se mantiene, de acuerdo al modelo predictivo de la desestacionalización con ENSO, el glaciar Jamapa, el del Citlaltépetl, podría durar más pero estaría cerca de desaparecer en el año 2200.
- Una forma de mejorar el modelo de desestacionalización con ENSO sería hacer todas las combinaciones entre las diferentes periodicidades arrojadas por la transformada de Fourier, pero para esto se necesitaría elaborar otro programa pues el número de combinaciones es de 1023. Aunque es posible que la disminución del error asociado entre modelo y datos experimentales sea muy poca.
- Este modelo toma en cuenta una variable fácil de medir que es la temperatura. Un modelo más completo debería tomar en cuenta más variables e incluso otras oscilaciones como la decadal del Pacífico.
- A futuro se piensa que sería posible incorporar otras variables, desde la radiación y la precipitación hasta el campo de vientos como fenómeno de transporte, para refinar la comparación con los glaciares de montaña.
- Este trabajo aporta una base de datos limpia y condensada de la temperatura en la tropósfera.

Apéndice A.1

Manual de instrucciones para procesar los datos de temperaturas

TODO LO SIGUIENTE ESTA ESCRITO PARA EJECUTARSE EN LINUX.

Se puede usar Matlab en Windows para ejecutar la parte de *Octave* y de hecho también se puede ejecutar los archivos escritos en C en Windows, pero lo que no se puede hacer es ejecutar el comando *awk*, *cat*, *grep* y *sed*. Este último contenido en el programa *LimpiarFechaConHora2*.

A. Si los datos están muy limpios y además todos los archivos tienen la misma extensión, se pueden concatenar con la instrucción:

```
cat *sdb nombre_todos_los_archivos
```

Donde sdb es la extensión de los archivos. Recuerde que Linux es sensible a mayúsculas y minúsculas.

B. Si los archivos no están suficientemente limpios, entonces se hace el siguiente procedimiento archivo por archivo.

1. Se colocan los archivos *LimpiarFechaConHora*, *LimpiarFechaConHora2* y *CalcularRegresion.m* en la misma carpeta de los datos de la estación a procesar. Los dos primeros están escritos en C, el segundo está escrito para *Octave* o *Matlab*.

2. Se ejecuta el programa desde la terminal y en esta misma carpeta con la instrucción:

```
./LimpiarFechaConHora nombre_del_archivo nombre_nuevo_del_archivo
```

Para cambiar el formato de los archivos a un formato que se pueda leer más fácilmente en Octave.

3. Se llama al programa Octave con la instrucción:

```
octave
```

4. Antes de ejecutar el programa se debe poner la altura sobre el nivel del mar, en metros, a la cual se encuentra la estación en turno en la línea 55 columna 5. También es deseable cambiar las alturas en la línea 92 columna 44 y línea 127 columna 46. Estas dos últimas acotan la búsqueda del cero. Para estaciones al norte como la de monterrey aquí se puede poner 1000 o 1500 y más al sur se puede poner 3000 incluso 3600.

5. Se ejecuta el programa en Octave con la instrucción:

```
[Mediciones,Ceros]=CalcularRegresion('nombre_nuevo_del_archivo');
```

6. Si se tienen problemas debido a que no está suficientemente limpio el archivo, entonces se ejecuta el otro archivo *LimpiarFechaConHora2*, en el paso 2.

7. Si se tienen problemas nuevamente en el paso 4, puede ser que sea en la primera línea del archivo ya limpio; bórrala, guarde el archivo y ejecute de nuevo el paso número 4.

8. El programa de Octave arroja fechas por si se produce algún error. Revise la última fecha en la que se ejecutó en el programa si se atora y entonces borre ese conjunto de datos o evalúe, de acuerdo a su experiencia, cual es el problema.

9. Si ya se procesaron los datos, entonces el programa arrojará 5 archivos que son:

- promediopormes.dat
- promediopormesreducido.dat
- maximopormes.dat
- minimopormes.dat
- todos_los_datos_esta_estacion.dat

10. Antes de hacer algo con estos archivos, es mejor ejecutar el paso 4 nuevamente para el año siguiente de la misma estación, ya que el programa arroja los resultados nuevos en los mismos archivos, sin borrar los datos ya guardados. Así es mejor ejecutar los archivos en orden y todos en una sola ocasión.

11. Los 4 primeros archivos contienen un renglón para cada año de medición o sea para cada archivo, y al abrirlo en Excel se acomodan todos en un mismo renglón.

12. Hay que transponer los datos para que sea más fácil su tratamiento y así quedan en una sola columna.

13. El último archivo contiene en este orden y por columnas:

año; mínimo anual, fecha del mínimo; máximo anual, fecha del máximo; mínimo reducido, fecha del mínimo reducido; máximo reducido, fecha del máximo reducido; promedio anual, su desviación estándar; promedio anual reducido, su desviación estándar; promedio anual con promedio diario, su desviación estándar; promedio anual con promedio diario reducido, su desviación estándar; promedio anual con promedio mensual, su desviación estándar; promedio anual con promedio mensual reducido, su desviación estándar; promedio por mes (12), su desviación estándar (12); promedio por mes reducido (12), su desviación estándar(12). Esta información también será desplegada en pantalla.

El promedio se obtuvo ajustando una recta a todos los datos buenos disponibles y después sacando el cero que corresponde a esta recta.

El promedio reducido significa que solamente se utilizaron dos pares de datos, uno antes y uno después de en donde en teoría se debería encontrar el cero. **Este segundo método es muy efectivo y es el que se usó en este trabajo;** pero debido a que los datos no son todos buenos, es muy bueno apoyarse en el promedio real, cuando un dato del promedio reducido, sea incoherente, es decir tenga un valor muy alto o muy bajo en comparación con lo esperado.

En teoría al final del archivo debería haber el mismo número de columnas, pero hay años que no tienen mediciones de todos los meses y es por eso que puede ser que no estén parejos. No hice un código para que los acomodara exactamente en el mes que les corresponde, por lo que esto se tiene que hacer manualmente.

C. Para limpiar los archivos que tengan extensión .AED

1. Se entra a la carpeta con los archivos .AED, primero se deben descomprimir los archivos y de preferencia juntarse todos los de un mismo año en una sola carpeta, para simplificar los procedimientos.

2. En la línea de comandos se escribe:

```
ls > lista.txt
```

Esto generará un archivo llamado lista.txt que contiene los nombres de todos los archivos en esa carpeta.

3. Se escribe el comando:

```
cat lista.txt | awk {'print "cat " $1 " | awk {@print \"\" $1 " \" $3 \" \" \"$5 \" \" $7@} > "$1".limpio"} > comando.sh
```

Arroja un archivo que se llama *comando.sh* que contiene una serie de instrucciones, una línea para cada archivo en la carpeta.

4. Se entra al archivo *comando.sh* desde gedit para editarlo y se cambian las @ por ' en la barra de menús, search y luego en replace; se salva.

5. En la línea de comando se escribe:

```
chmod 777 comando.sh
```

para obtener todos los permisos de lectura y escritura en el nuevo archivo generado.

6. Se ejecuta el programa *comando.sh* con la instrucción:

```
./comando.sh
```

Lo que hace es que toma el archivo *lista*, que a su vez contiene el nombre del archivo y de ese archivo toma solamente la columna 1,3,5 y 7 y luego las reescribe en un archivo que se llama igual que el primero mas *.limpio*

7. Se concatenan todos los archivos limpios con la instrucción:

```
cat *limpio > todosloslimpios.dat
```

y los escribe en *todosloslimpios.dat*

8. Se escribe:

```
grep ' 0.0 ' todosloslimpios.dat > ceros.dat
```

esta instrucción arroja todos los renglones que tienen 0.0 y los escribe en *ceros.dat*

9. Se entra a *ceros.dat* con *gedit* y se cambia *.AED* por un *espacio*, para poder tratar las fechas como números.

10. Dado que estos datos tienen una mejor precisión, es posible que para una misma medición haya varios ceros a diferentes alturas, por lo que entonces se ejecuta en Octave el siguiente programa:

```
[Mediciones,Ceros]=CalcularRegresion3('ceros.dat');
```

para que tome la altura más baja y además para que arroje los archivos que se explicaron arriba excepto por uno, el de promedio por mes reducido. Obviamente hay que poner el archivo *CalcularRegresion3.m* en la misma carpeta que los archivos.

11. Se hace este procedimiento para cada carpeta.

Si faltan datos en algún año mes o incluso día, entonces se entra a la página esrl.noaa.gov/raobs y ahí se descargan los datos faltantes de las estaciones que se quieran. Hay que hacer notar que aquí los datos se pueden descargar desde un día hasta los datos de varios años juntos. Personalmente recomiendo que se descarguen todos los datos de un solo año. Por alguna razón que desconozco, la página a veces no deja bajar los datos por estación de un año completo, pero lo que sí se puede hacer es bajar los datos de todas las estaciones juntas de un solo año en un solo archivo. En este caso hay que salvar el archivo y luego cortar cada pedazo correspondiente a cada estación. Esto se indica en el paso 6a.

D. Otro problema con el formato de los datos

1. Una vez que se descargan los datos de la página se copian y se pegan en *gedit* y se guardan.

2. Se le da clic derecho al archivo y se abre con una hoja de cálculo. En las opciones hay que marcar como delimitador el tabulador o el espacio.

3. En la hoja de cálculo se borran las columnas que están en blanco. Muy posiblemente la única columna en blanco sea la primera. Se salva en el mismo formato en el que se abrió.

4. Se vuelve a abrir este archivo pero ahora con *gedit* y se dará una cuenta de que tiene `;` o `"` en donde debería tener un *espacio*, entonces se va a la barra de menús y se le da en *search* y luego *replac* y se reemplaza `;` o `"` por un *espacio* en blanco. Tal vez esta acción llevará varios segundos. Se salva el archivo.

5. Ahora se ejecuta el programa para limpiarlo desde la terminal y en la carpeta donde está el archivo con la siguiente instrucción. Hay que notar que aquí se está usando un archivo

ligeramente diferente para limpiar los datos que tiene una modificación para que reconozca el salto de línea.

```
./LimpiarFechaConHora2 nombre_del_archivo nombre_nuevo_del_archivo
```

6. Se entra nuevamente al archivo y se borra la primera línea y se salva.

6a. Entra uno al archivo que contiene todas las estaciones para ese año y se corta cada pedazo de datos y se copia en un nuevo archivo. Es preferible hacerlo justo en este momento, pues así se tiene la referencia de la estación, ya que en el siguiente paso esa referencia se borrará para poder hacer el cálculo con *Octave*.

7. Debido al formato, el nombre de la estación seguirá apareciendo por lo que se ejecuta desde la terminal la instrucción:

```
sed '/VER/d' nombre_del_archivo > nombre_nuevo_del_archivo
```

Donde VER corresponde en este ejemplo a la estación Veracruz. Hay que entrar en el archivo y ver que dice para cada estación y así cambiarle a esta instrucción debidamente. Lo demás se queda igual.

8. Se ejecuta *Octave* y se siguen los pasos desde el inciso 5 de la sección B de este apéndice.

Apéndice A.2

Programas escritos en C para cambiarle el formato del archivo original a uno que pueda ser procesado de manera más eficiente.

Archivo sin la hora de medición

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int blop(char s[20])
{
    if (s=="JAN") { return 1; }
    return 0;
}

int main(int argc, char *argv[])
{
    FILE *entrada, *salida;
    entrada = fopen (argv[1], "r");
    salida = fopen (argv[2], "w");

    char comando[950];
    char comando2[950];

    char ca[4];
    char p11[20], p12[20], p13[20], p14[20];
    char p21[20], p22[20], p23[20], p24[20], p25[20], p26[20];
    char p31[20], p32[20], p33[20], p34[20], p35[20];
    char crap[20];

    long int i=0;

    ca[i]='\n'; i++;

    fscanf(entrada, "%s %s %s %s %s\n", &crap, &p11, &p12, &p13, &p14);
    fscanf(entrada, "%s %s %s %s %s %s\n", &p21, &p22, &p23, &p24, &p25, &p26);
    fscanf(entrada, "%s %s %s %s %s\n", &p31, &p32, &p33, &p34, &p35);
    fprintf(salida, "%s%s%02d%s      ", p14, p13, atoi(p12), p11);
    while (fscanf(entrada, "%c", &ca[0]) != EOF)
    {
        if (ca[0]=='\n')
        {
            fscanf(entrada, "%c", &ca[1]);
            fscanf(entrada, "%c", &ca[2]);
            fscanf(entrada, "%c", &ca[3]);
            if ((ca[3]=='4')
                && (ca[2]=='5')
                && (ca[1]=='2')
                && (ca[0]=='\n'))
            {
                // Si aquí empieza un header

                fscanf(entrada, "%s %s %s %s\n", &p11, &p12, &p13, &p14);
                fscanf(entrada, "%s %s %s %s %s %s\n", &p21, &p22, &p23, &p24, &p25, &p26);
                fscanf(entrada, "%s %s %s %s %s\n", &p31, &p32, &p33, &p34, &p35);
                fscanf(entrada, "%c", &ca[0]);
                fprintf(salida, "\n");
            }
        }
    }
}
```

```

        fprintf(salida,"%s%s%02d%s    ",p14,p13,atoi(p12),p11);
    }
    else
    {
        fprintf(salida,"%c",ca[0]);
        fprintf(salida,"%s%s%02d%s    ",p14,p13,atoi(p12),p11);
        fprintf(salida,"%c",ca[1]);
        fprintf(salida,"%c",ca[2]);
        fprintf(salida,"%c",ca[3]);
        continue;
    }
}

    fprintf(salida,"%c",ca[0]);

}
fclose(salida);
strcpy(comando,"sed
's/JAN/01/g;s/FEB/02/g;s/MAR/03/g;s/APR/04/g;s/MAY/05/g;s/JUN/06/g;s/JUL/07/g;s/AUG/08/
g;s/SEP/09/g;s/OCT/10/g;s/NOV/11/g;s/DEC/12/g;' ");
strcat(comando,argv[2]);
strcat(comando," > TMPFILE && sed '$d' TMPFILE > ");
strcat(comando,argv[2]);

system(comando);

}

```

Archivo con la hora de la medición

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int blop(char s[20])
{
    if (s=="JAN") { return 1; }
    return 0;
}

int main(int argc, char *argv[])
{
    FILE *entrada, *salida;
    entrada = fopen (argv[1],"r");
    salida = fopen (argv[2],"w");

    char comando[950];
    char comando2[950];

    char ca[4];
    char p11[20],p12[20],p13[20],p14[20];
    char p21[20],p22[20],p23[20],p24[20],p25[20],p26[20];
    char p31[20],p32[20],p33[20],p34[20],p35[20];
    char crap[20];

    long int i=0;

    ca[i]='\n'; i++;

```

```

fscanf(entrada,"%s %s %s %s %s\n",&crap,&p11,&p12,&p13,&p14);
fscanf(entrada,"%s %s %s %s %s %s\n",&p21,&p22,&p23,&p24,&p25,&p26);
fscanf(entrada,"%s %s %s %s %s\n",&p31,&p32,&p33,&p34,&p35);
fprintf(salida,"%s%s%02d%s      ",p14,p13,atoi(p12),p11);
while (fscanf(entrada,"%c",&ca[0])!=EOF)
{
    if (ca[0]=='\n')
    {
        fscanf(entrada,"%c",&ca[1]);
        fscanf(entrada,"%c",&ca[2]);
        fscanf(entrada,"%c",&ca[3]);
    if ((ca[3]=='4')
        && ( ca[2]=='5' )
        && ( ca[1]=='2' )
        && ( ca[0]=='\n' ))
    { // Si aqui empieza un header

        fscanf(entrada,"%s %s %s %s\n",&p11,&p12,&p13,&p14);
        fscanf(entrada,"%s %s %s %s %s %s\n",&p21,&p22,&p23,&p24,&p25,&p26);
        fscanf(entrada,"%s %s %s %s %s\n",&p31,&p32,&p33,&p34,&p35);
        fscanf(entrada,"%c",&ca[0]);
        while (ca[0]!='\n')
        {
            fscanf(entrada,"%c",&ca[0]);
        }
        fscanf(entrada,"%c",&ca[0]);
        fprintf(salida,"\n");
        fprintf(salida,"%s%s%02d%s      ",p14,p13,atoi(p12),p11);
    }
    else
    {
        fprintf(salida,"%c",ca[0]);
        fprintf(salida,"%s%s%02d%s      ",p14,p13,atoi(p12),p11);
        fprintf(salida,"%c",ca[1]);
        fprintf(salida,"%c",ca[2]);
        fprintf(salida,"%c",ca[3]);
        continue;
    }
}

    fprintf(salida,"%c",ca[0]);

}
fclose(salida);
strcpy(comando,"sed
's/JAN/01/g;s/FEB/02/g;s/MAR/03/g;s/APR/04/g;s/MAY/05/g;s/JUN/06/g;s/JUL/07/g;s/AUG/08/
g;s/SEP/09/g;s/OCT/10/g;s/NOV/11/g;s/DEC/12/g;' ");
strcat(comando,argv[2]);
strcat(comando," > TMPFILE && sed '$d' TMPFILE > ");
strcat(comando,argv[2]);

system(comando);
}

```

Apéndice A.3

Programa para calcular la isoterma 0 °C

```
% PROGRAMA PARA ANALIZAR LOS DATOS QUE SE OBTIENEN CON LA SONDA METEOROLÓGICA, EN
ESPECIAL PARA CALCULAR LA ISOTERMA CERO
% REALIZADO POR ERIC BENJAMÍN TÉLLEZ UGALDE erictellez@gmail.com
erictellez@hotmail.com
% CON LA ASESORÍA DE M.C. VICTOR MIRELES CHAVEZ

%*****% 1. NOMBRE DEL PROGRAMA Y ENTRADA DE DATOS *****
function [Mediciones,Ceros] = CalcularRegresion(NombreArchivo)

%*****% 2. ANALISIS DE DATOS *****
Archivo = load (NombreArchivo); % Carga el archivo.
Fechas = Archivo(:,1); % Asigna todos los renglones de la columna 1 al
vector fechas.
totalarchivo=length(Fechas); % Longitud del vector Fechas.

% Ciclo para homologar el formato de las fechas.
for p=1:totalarchivo
    if (Fechas(p) < 1000000000) % Este condicional lo puse para poder hacer el
promedio de todas las fechas de manera más fácil, ya que el archivo que genera el
otro programa arroja las fechas y las horas de la medición pegadas en un sólo
numero de la forma aaaammddhh, pero si una medición se había realizado a las 6 de
la mañana el numero que resultaba era aaaammdd6 y si la medición se había realizado
a las 3 de la tarde entonces arroja aaaammdd15, dando un número 10 veces más
grande. Entonces la siguiente operación cambia por ejemplo aaaammdd6 por
aaaammdd06.
        Fechas(p)=10*Fechas(p)-9*rem(Fechas(p),10);
    end
end

FechasUnicas = unique(Fechas); % Busca dentro de fechas, las fechas que son
diferentes o Ñnicas y lo asigna a FechasUnicas, es decir, FechasUnicas es un
vector en el que cada entrada contiene cada fecha diferente del archivo.
totfechas = length(FechasUnicas); % Busca la longitud del vector FechasUnicas y el
total se lo asigna a totfechas.

Mediciones=[]; % Se crea el vector mediciones vacío.
Ceros=[]; % Se crea el vector ceros vacío.
MedicionesRed=[];
CerosReducidos=[]; % Vector de ceros construido a partir de los dos anteriores.
disp('Año')
floor(FechasUnicas(1)/1000000)
disp('Mediciones totales')
numel(FechasUnicas) % Despliega el número de fechas diferentes.

% Empieza un ciclo para analizar todas las fechas diferentes
for i=1:totfechas

    unafecha=FechasUnicas(i); % Asigna a la variable unafecha el valor de la
entrada i de FechasUnicas.
```

```

    MisIndices=find(Fechas==unafecha); % Busca dentro de Fechas las que son iguales
a unafecha y el total de fechas iguales se lo asigna a misindices.
    CuantasEstaFecha=length(MisIndices); % Le asigna a cuantasestafecha la longitud
del vector misindices, que es el total de datos que hay para esa fecha en
específico.

    Altura=[]; % Se crea el vector de alturas vacío.
    Temperatura=[]; % Se crea el vector temperatura vacío.
    IndicesOrdenados=[];
    IndiceMin=[];
    TemperaturaOrdenada=[];
    AlturaReducida=[];
    TemperaturaReducida=[]; % Se crean el vector AlturaReducida y
TemperaturaReducida para almacenar el par de datos que nos servirán para hacer el
ajuste.

    % Se abre otro ciclo para analizar todos los datos de cada fecha.
    for j=1:CuantasEstaFecha

        % Condiciones sobre los datos.
        if (Archivo(MisIndices(j),5) == 99999) % Si en la columna de la
temperatura esta el valor 99999, quiere decir que en realidad no hay datos,
entonces se lo salta.
            continue;
        elseif (Archivo(MisIndices(j),4) <= 2230) % Reduce el rango de búsqueda
de los datos desde el número que aparece (en MSNM), en este renglón se debería
poner la altura a la cual se encuentra la estación.
            continue;
        elseif (Archivo(MisIndices(j),4) >= 6000) % Reduce el rango de
los datos hasta el número que aparece (en MSNM).
            continue;
        else
            % Si el valor cae en el rango que esta puesto arriba, entonces se
asigna el valor de la columna 4 del archivo al vector altura, junto con el valor
que le corresponde a la columna cinco, al vector temperatura.
            Altura=[Altura,[Archivo(MisIndices(j),4)]];
            Temperatura=[Temperatura,[Archivo(MisIndices(j),5)]];
            end % Fin del condicional.

    end % Fin del primer ciclo.

    vacia=isempty(Altura); % Esta función verifica si el vector altura esta vacío.
    uno=numel(Altura); % Número de elementos del vector Altura.

    if (vacia == 1) % Si el vector altura esta vacío, la función isempty arroja un
1, y entonces el programa se salta este cálculo y se va a la siguiente fecha.
        continue;
    elseif (uno == 1) % Si el vector tiene un elemento, se salta el cálculo también.
        continue;
    else % Si tiene dos o más elementos la matriz, entonces hace los siguientes
cálculos.
        P=polyfit(Temperatura,Altura,1); % Ajusta los vectores Temperatura y Altura a
orden 1, o sea una recta.
        cero=polyval(P,0); % Obtiene el valor cero de esa recta.
        Mediciones=[Mediciones,[unafecha]]; % Construye el vector Mediciones con las
fechas.

```

```

Ceros=[Ceros,[cero]]; % Construye el vector Ceros con los valores de la altura
a la cual se encuentra la temperatura cero.
[AlturaMinAnual,IndiceFechaMin]=min(Ceros); % Arroja el máximo valor de ceros,
que es la altura mínima a la cual se encuentra la isoterma.
FechaMin=Mediciones(IndiceFechaMin); % Arroja la fecha de este máximo.
[AlturaMaxAnual,IndiceFechaMax]=max(Ceros); % Arroja el máximo valor de ceros,
que es la altura mínima a la cual se encuentra la isoterma.
FechaMax=Mediciones(IndiceFechaMax); % Arroja la fecha de este máximo.

```

```

% ESTE PEDAZO LO PUSE PARA HACER EL PROMEDIO UNICAMENTE CON DOS DATOS, EL ULTIMO
POSITIVO Y EL PRIMER NEGATIVO. HAY DOS PROBLEMAS PRINCIPALES: 1. QUE LOS VALORES
ANTERIOR Y POSTERIOR AL MÍNIMO SEAN DEL MISMO SIGNO, 2. QUE EL VALOR DE LA CELDA
ANTERIOR SEA NEGATIVO MIENTRAS QUE EL VALOR DE LA CELDA POSTERIOR SEA POSITIVO. SI
LOS DATOS NO SON BUENOS Y ADEMAS NO SE CUMPLEN NINGUNO DE ESTOS DOS PROBLEMAS
ENTONCES EL PROGRAMA AGARRA LOS DATOS SIN REDUCIR, ES DECIR EN EL RANGO ESCRITO
ARRIBA, PARA SACAR EL PROMEDIO; ESTOS CASOS SON POCOS.

```

```

IndiceMax=length(Altura); % La longitud de Altura y de Temperatura es la misma.
[TemperaturaOrdenada,IndicesOrdenados]=sort(abs(Temperatura)); % Ordena los
valores aboslutos del vector temperaturas de menor a mayor y se lo asigna al vector
TemperaturaOrdenada y también crea el vector de índices IndicesOrdenados, con el
que se manipulará el resto del código.

```

```

% Inicia un ciclo para asignar el menor valor que este en el rango
seleccionado. Generalmente será el número 1, pero justamente este ciclo asegura que
ese mínimo caiga en el rango.

```

```

for s=1:IndiceMax
% Un condicional para asignarle el valor mínimo a datos que estén entre 3600 y
6000.
    if (Altura(IndicesOrdenados(s))<3000) || (Altura(IndicesOrdenados(s))>6000)
        continue; % Si no cae en el rango va con el siguiente.
    else
        IndiceMin=IndicesOrdenados(s); % Asigna a IndiceMin, el valor mínimo del
vector IndicesOrdenados.
        AlturaReducida=[AlturaReducida,[Altura(IndiceMin)]]; % Asigna a la variable
AlturaReducida el valor de la entrada del vector Altura que tiene el indice
IndicesOrdenados, es decir, asigna el valor para el cual la altura tiene una
temperatura cercana a cero.
        TemperaturaReducida=[TemperaturaReducida,[Temperatura(IndiceMin)]]; %
Asigna el valor de la temperatura mas cercano a cero a TemperaturaReducida.
        break; % Rompe al encontrar el primero que cumpla las condiciones.
    end % Fin de la condición.
end % Fin del ciclo.

```

```

% Condicional por si IndiceMin esta vacío.

```

```

if (IndiceMin==[])
    AlturaReducida=Altura;
    TemperturaReducida=Temperatura;

```

```

% Condicionales por si el valor mínimo es el primer elemento, lo toma y toma el
siguiente, o por si es el último entonces lo toma y toma el anterior.

```

```

elseif (IndiceMin == 1)
    AlturaReducida=[AlturaReducida,[Altura(IndiceMin+1)]];
    TemperaturaReducida=[TemperaturaReducida,[Temperatura(IndiceMin+1)]];
elseif (IndiceMin == IndiceMax)
    AlturaReducida=[AlturaReducida,[Altura(IndiceMin-1)]];

```

```

    TemperaturaReducida=[TemperaturaReducida, [Temperatura (IndiceMin-1)]];

    % Condicionales para recopilar los datos para hacer la recta reducida, estas
    dos instrucciones son para los datos "ideales",
    elseif (IndiceMin>1) && (Temperatura(IndiceMin)<=0) &&
(Temperatura(IndiceMin-1)>0)
        AlturaReducida=[AlturaReducida, [Altura (IndiceMin-1)]];
        TemperaturaReducida=[TemperaturaReducida, [Temperatura (IndiceMin-1)]];
    elseif (IndiceMin>1) && (Temperatura(IndiceMin)>=0) &&
(Temperatura(IndiceMin+1)<0)
        AlturaReducida=[AlturaReducida, [Altura (IndiceMin+1)]];
        TemperaturaReducida=[TemperaturaReducida, [Temperatura (IndiceMin+1)]];

    % Condicional para sortear datos anómalos. Los datos adyacentes al mínimo que
    tienen ambos el mismo signo o que el anterior es negativo y el siguiente es
    positivo (cuando debería de suceder lo contrario). Lo que hace es que busca el
    siguiente número más pequeño y verifica que este en el rango, después asigna a ese
    como mínimo y comprueba que cumpla con las condiciones, si no lo hace se repite el
    ciclo hasta que encuentra uno.
    elseif (IndiceMin>1) && (((Temperatura(IndiceMin-1)<0) &&
(Temperatura(IndiceMin+1)>0)) || ((Temperatura(IndiceMin-1)>0) &&
(Temperatura(IndiceMin+1)>0)) || ((Temperatura(IndiceMin-1)<0) &&
(Temperatura(IndiceMin+1)<0)))
        %FechasUnicas(i)-10000000000 % Me da la fecha por si se produce un error, si se
        quieren procesar datos de años del 2000 en adelante se escribe 20000000000 y si se
        quieren procesar años antes de 1999 se escribe 10000000000
        for r=2:IndiceMax-1
            if (Altura (IndicesOrdenados (r))<3000) || (Altura (IndicesOrdenados (r))>6000)
                continue;
            elseif (Temperatura (IndicesOrdenados (r))<0) &&
(Temperatura (IndicesOrdenados (r)-1)>0)
                AlturaReducida=[AlturaReducida, [Altura (IndicesOrdenados (r)-1)]];
                TemperaturaReducida=[TemperaturaReducida, [Temperatura (IndicesOrdenados (r)-
1)]];
                break;
            elseif (Temperatura (IndicesOrdenados (r))>0) &&
(Temperatura (IndicesOrdenados (r)+1)<0)
                AlturaReducida=[AlturaReducida, [Altura (IndicesOrdenados (r)+1)]];
                TemperaturaReducida=[TemperaturaReducida, [Temperatura (IndicesOrdenados (r)
+1)]];
                break;
            end % Fin del condicional de datos adyacentes negativos e iguales en signo
            al min.
        end % Fin del ciclo.

    %Ultimo condicional para los casos no previstos.
    else
        AlturaReducida=Altura;
        TemperaturaReducida=Temperatura;
    end % Fin del condicional para datos anómalos.

    vaciareducida=isempty(AlturaReducida);
    un=numel(AlturaReducida);

```

```

    if (vaciareducida == 1) % Es para prevenir que se hagan promedios con matrices
vacías o con matrices con un solo elemento. Si esto llegara a pasar hay que revisar
los datos.
        disp('Fechas en que la matriz con datos reducidos esta vacía')
        AlturaReducida % Esto lo puse porque 'Mediciones buenas' y 'Mediciones
Reducidas' deben coincidir para simplificar el cálculo.
        FechasUnicas(i)-1000000000 % Entonces me da la fecha para poder corregirlo
en los datos.
        continue;
    elseif (un == 1)
        disp('Fechas en que la matriz con datos reducidos tiene un elemento')
        AlturaReducida
        FechasUnicas(i)-1000000000
        continue;
    else
        % Ajuste de los Vectores reducidos.
        PRed=polyfit(TemperaturaReducida,AlturaReducida,1); % Ajusta los
vectores TemperaturaReducida y AlturaReducida a orden 1, o sea una recta.
        cerored=polyval(PRed,0); % Obtiene el valor cero de esa recta.
        CerosReducidos=[CerosReducidos,[cerored]]; % Construye el vector
CerosReducidos con los valores de la altura a la cual se encuentra la temperatura
cero.
        [AlturaMinAnualRed,IndiceFechaMinRed]=min(CerosReducidos); % Arroja el
máximo valor, que es la altura mínima a la cual se encuentra la isoterma.
        FechaMinRed=Mediciones(IndiceFechaMinRed); % Arroja la fecha de este
máximo.
        [AlturaMaxAnualRed,IndiceFechaMaxRed]=max(CerosReducidos); % Arroja el
máximo valor, que es la altura mínima a la cual se encuentra la isoterma.
        FechaMaxRed=Mediciones(IndiceFechaMaxRed); % Arroja la fecha de este
máximo.
        %MedicionesRed=[MedicionesRed,[unafecha]];
    end

end % Fin del condicional.

end % Fin del segundo ciclo.
%Mediciones'-1000000000
disp('Mediciones buenas')
numel(Ceros) % Cuenta cuantas entradas tiene el vector mediciones, dependiendo de
las condiciones (el rango de las alturas en Ln 52 Col 57 y Ln 54 Col 57) debe dar
menor o igual que las Mediciones totales.
disp('Mediciones reducidas')
numel(CerosReducidos)
% Fin del promedio por medición.

% PROMEDIO DIARIO
% Lo que hace el programa, es que agarra el vector mediciones y divide entre 100 y
deja solamente la parte entera, entonces con esto se quita la hora, y quedarán
números iguales para los mismos días, aunque de horas diferentes. Agarra el índice
del vector de esos números y promedia los ceros que se encuentran en esos índices.
Fechasdiarias=floor(Mediciones./100); % Divide cada entrada del vector mediciones
entre 100 y se queda con la parte entera, eso se lo asigna al vector
Medicionesdiarias.
diasunicos=unique(Fechasdiarias); % Busca en Fechasdiarias los que son diferentes.

```

```

totaldias=length(diasunicos); % Da el valor de la longitud del vector día.
medicionespordia=[]; % Crea el vector vacío.
promediopordia=[]; % Crea el vector vacío.
promediopordiared=[]; % Crea el vector vacío.

% Inicio del ciclo para el cálculo del promedio por día.
for k=1:totaldias
    undia=diasunicos(k); % Asocia la entrada k de diasunicos a undia.
    indicesmediciones=find(Fechasdiarias==undia); % Busca en Fechasdiarias los
que son iguales a undia y arroja el índice de esa entrada y la pone en
indicesmediciones.
    estedia=length(indicesmediciones); % Da la longitud de indicesmediciones.
    cerospordia=[]; % Crea el vector vacío.
    cerospordiared=[];

    % Este ciclo toma el índice obtenido en indicesmediciones y busca el valor del
vector ceros que corresponde a ese índice y lo asigna al vector cerospordia.
    for l=1:estedia
        cerospordia=[cerospordia, [Ceros(indicesmediciones(l))]];
        cerospordiared=[cerospordiared, [CerosReducidos(indicesmediciones(l))]];
        % El anterior comando es para hacer el promedio reducido, con la
temperatura reducida y la altura reducida.
    end

    ppd=mean(cerospordia); % Sacar el promedio del vector cerospordia.
    ppdr=mean(cerospordiared);
    medicionespordia=[medicionespordia, [undia]]; % Construye el vector
medicionporfecha que contiene las fechas sin las horas, a diferencia del vector
mediciones.
    promediopordia=[promediopordia, [ppd]]; % Construye un vector con los promedios
por día.
    promediopordiared=[promediopordiared, [ppdr]];

end

% Fin del promedio diario.

% PROMEDIO MENSUAL
% El programa agarra el promedio diario calculado arriba y sobre de eso hace el
promedio mensual.
Fechasmensuales=floor(medicionespordia./100); % Divide cada entrada del vector
Medicionespordia entre 100 y se queda con la parte entera para quedarse solo con
los meses y los años.
mesesunicos=unique(Fechasmensuales); % Lo mismo que para promedio diario.
totalmeses=length(mesesunicos);
medicionespormes=[];
promediopormes=[];
desvest=[];
promediopormesred=[];
desvestred=[];
minimopormes=[];
maximopormes=[];

for m=1:totalmeses
    unmes=mesesunicos(m);

```

```

indicesmensuales=find(Fechasmensuales==unmes);
estemes=length(indicesmensuales);
cerospormes=[];
cerospormesred=[];

for n=1:estemes
    cerospormes=[cerospormes,[promediopordia(indicesmensuales(n))]];
    cerospormesred=[cerospormesred,[promediopordiared(indicesmensuales(n))]];
end

maxpormes=max(cerospormes); % Valor máximo por cada mes.
minpormes=min(cerospormes); % Valor mínimo por cada mes.

ppm=mean(cerospormes);
sd=std(cerospormes);
ppmr=mean(cerospormesred);
sdr=std(cerospormesred);
medicionespormes=[medicionespormes,[unmes]];
promediopormes=[promediopormes,[ppm]]; % Construye el vector promediopormes
que tiene en cada entrada el promedio mensual de la isoterma cero.
desvest=[desvest,[sd]]; % Contruye un vector con las desviaciones.
promediopormesred=[promediopormesred,[ppmr]]; % Lo mismo pero con las
reducidas.
desvestred=[desvestred,[sdr]];

maximopormes=[maximopormes,[maxpormes]]; % Vector con el valor máximo por cada
mes.
minimopormes=[minimopormes,[minpormes]]; % Vector con el valor mínimo por cada
mes.
end
% Fin del promedio mensual.

%*****% 3. SALIDA DE RESULTADOS *****

file_id = fopen('todos_los_datos_esta_estacion.dat', 'a'); % Esta instrucción es
para abrir un archivo y escribir en él.

fprintf(file_id,'%i ',floor(FechasUnicas(1)/1000000)); % Para imprimir el año.
fprintf(file_id,"%i ",numel(FechasUnicas)); % Para imprimir los datos totales.
fprintf(file_id,"%i ",numel(Ceros)); % Para imprimir los datos buenos.
fprintf(file_id,"%i ",numel(CerosReducidos)); %Para imprimir los datos buenos
reducidos.

disp(' ') % Inserta una línea en blanco.
disp('Datos reducidos significa que se ajusto la recta con únicamente dos pares de
datos')
disp(' ')
disp('Valores Extremos')
disp('Mínimo y su fecha')
min(Ceros) % Con esta instrucción se despliegan los datos en la pantalla y también
para que se vea si está bien.
FechaMin-1000000000
fprintf(file_id,'%f ',min(Ceros)) % Esta instrucción imprime la salida de los datos
en el archivo que esta abierto.

```

```

fprintf(file_id,'%d ',FechaMin-1000000000) % Esta instrucción imprime la fecha de
estos datos.
disp('Máximo y su fecha')
max(Ceros)
FechaMax-1000000000
fprintf(file_id,'%f ',max(Ceros))
fprintf(file_id,'%d ',FechaMax-1000000000)
disp('Valores Extremos Reducidos')
disp('Mínimo y su fecha')
min(CerosReducidos)
FechaMinRed-1000000000
fprintf(file_id,'%f ',min(CerosReducidos))
fprintf(file_id,'%d ',FechaMinRed-1000000000)
disp('Máximo y su fecha')
max(CerosReducidos)
FechaMaxRed-1000000000
fprintf(file_id,'%f ',max(CerosReducidos))
fprintf(file_id,'%d ',FechaMaxRed-1000000000)
% Promedio anual tomando cada medición.
disp('Promedio anual tomando cada medición y su desviación estándar')
mean(Ceros)
std(Ceros)
fprintf(file_id,'%f ',mean(Ceros)) % La media de Ceros, es la anual de todos
los datos.
fprintf(file_id,'%f ',std(Ceros)) % La desviación de Ceros.
disp('Promedio anual con los datos reducidos')
mean(CerosReducidos)
std(CerosReducidos)
fprintf(file_id,'%f ',mean(CerosReducidos))
fprintf(file_id,'%f ',std(CerosReducidos))
%plot(Mediciones,Ceros) % Grafica las alturas, pero creo que esta instrucción
está mal.

% Promedio anual tomando el promedio diario
disp('Promedio anual tomando el promedio diario y su desviación estándar')
mean(promediopordia)
std(promediopordia)
fprintf(file_id,'%f ',mean(promediopordia))
fprintf(file_id,'%f ',std(promediopordia))
disp('Promedio anual tomando el promedio diario pero con datos reducidos')
mean(promediopordiare)
std(promediopordiare)
fprintf(file_id,'%f ',mean(promediopordiare))
fprintf(file_id,'%f ',std(promediopordiare))
%plot(medicionespordia,promediopordia)

% Promedio anual tomando el promedio mensual.
disp('Promedio anual tomando el promedio mensual y su desviación estándar')
mean(promediopormes)
std(promediopormes)
fprintf(file_id,'%f ',mean(promediopormes))
fprintf(file_id,'%f ',std(promediopormes))
disp('Promedio anual tomando el promedio mensual pero con datos reducidos')
mean(promediopormesred)
std(promediopormesred)
fprintf(file_id,'%f ',mean(promediopormesred))

```

```

fprintf(file_id, '%f ', std(promediopormesred))

% Promedio mensual de cada mes.
file_mean_mes = fopen('promediopormes.dat', 'a');
disp('Promedio por cada mes')
promediopormes'
desvest'
for i=1:length(promediopormes)
    fprintf(file_id, '%f ', promediopormes(i))
    fprintf(file_mean_mes, '%f ', promediopormes(i))
end
for i=1:length(desvest)
    fprintf(file_id, '%f ', desvest(i))
end
fclose(file_mean_mes);

file_mean_mes_red = fopen('promediopormesred.dat', 'a');
disp('Promedio por cada mes reducido')
promediopormesred'
desvestred'
for i=1:length(promediopormesred)
    fprintf(file_id, '%f ', promediopormesred(i))
    fprintf(file_mean_mes_red, '%f ', promediopormesred(i))
end
for i=1:length(desvestred)
    fprintf(file_id, '%f ', desvestred(i))
end
fclose(file_mean_mes_red);
%plot(medicionespormes, promediopormes)

% Máximo por cada mes.
file_max_mes= fopen('maximopormes.dat', 'a');
disp('Máximo por cada mes')
maximopormes'
for i=1:length(maximopormes)
    fprintf(file_id, '%f ', maximopormes(i))
    fprintf(file_max_mes, '%f ', maximopormes(i))
end
fclose(file_max_mes);

% Mínimo por mes.
file_min_mes= fopen('minimopormes.dat', 'a');
disp('Mínimo por cada mes')
minimopormes'
for i=1:length(minimopormes)
    fprintf(file_id, '%f ', minimopormes(i))
    fprintf(file_min_mes, '%f ', minimopormes(i))
end
fclose(file_min_mes);

fprintf(file_id, '\n'); % Le inserta un salto de línea al archivo, para que la
siguiente vez que se abra ese archivo, se comience a escribir desde la línea que le
sigue.
fclose(file_id); % Cierra el archivo abierto.

end % Fin del programa.

```

Apéndice A.4

Programa para calcular la isoterma 0°C

```
%PROGRAMA PARA ANALIZAR LOS DATOS QUE SE OBTIENEN CON LA SONDA METEOROLÓGICA, EN
ESPECIAL PARA CALCULAR LA ISOTERMA CERO
%REALIZADO POR ERIC BENJAMÍN TÉLLEZ UGALDE erictellez@gmail.com
erictellez@hotmail.com

%-----
%El programa CalcularRegresion3 se hizo para poder analizar los datos del año 2000
en adelante, pues estos tienen otro formato diferente a los de los datos que están
antes.
%Este archivo es más pequeño
%-----

%*****% 1. NOMBRE DEL PROGRAMA Y ENTRADA DE DATOS *****
function [Mediciones,Ceros] = CalcularRegresion3(NombreArchivo)

%*****% 2. ANALISIS DE DATOS *****
Archivo = load(NombreArchivo); % carga el archivo
Fechas = Archivo(:,1); % asigna todos los renglones de la columna 1 al
vector fechas
totalarchivo=length(Fechas); %longitud de Fechas

FechasUnicas = unique(Fechas); % busca dentro de fechas, las fechas que son
diferentes y lo asigna a FechasUnicas, es decir, FechasUnicas es un vector en el
que cada entrada contiene cada fecha diferente del archivo
totfechas = length(FechasUnicas); % busca la longitud del vector FechasUnicas y el
total se lo asigna a totfechas

Mediciones=[]; % se crea el vector mediciones vacío
Ceros=[]; % se crea el vector ceros vacío

% empieza un ciclo para analizar todas las fechas diferentes
for i=1:totfechas

    unafecha=FechasUnicas(i); % asigna a la variable unafecha el valor de la
entrada i de FechasUnicas
    MisIndices=find(Fechas==unafecha); % Busca dentro de Fechas las que son
iguales a unafecha y el total de fechas iguales se lo asigna a misindices
    Ceros=[Ceros,[Archivo(MisIndices(1),2)]]; %asigna al vector ceros la altura
que corresponde al primer cero que se encuentra en el archivo
    Mediciones=[Mediciones,[unafecha]]; % construye el vector Mediciones con las
fechas

end % fin del ciclo línea 26

[AlturaMinAnual,IndiceFechaMin]=min(Ceros); %Arroja el máximo valor de
ceros, que es la altura mínima a la cual se encuentra la isoterma
FechaMin=Mediciones(IndiceFechaMin); %Arroja la fecha de este máximo
[AlturaMaxAnual,IndiceFechaMax]=max(Ceros); %Arroja el máximo valor de
ceros, que es la altura máxima a la cual se encuentra la isoterma
```

```

FechaMax=Mediciones(IndiceFechaMax); %Arroja la fecha de este máximo

%Fin del promedio por medición

% PROMEDIO DIARIO
% lo que hace el programa, es que agarra el vector mediciones y divide entre 100 y
deja solamente la parte entera, entonces con esto se quita la hora, y quedaran
números iguales para los mismos días, aunque de horas diferentes. Agarra el índice
del vector de esos números y promedia los ceros que se encuentran en esos índices
Fechasdiarias=floor(Mediciones./100); %Divide cada entrada del vector mediciones
entre 100 y se queda con la parte entera, eso se lo asigna al vector
Medicionesdiarias
diasunicos=unique(Fechasdiarias); % Busca en Fechasdiarias los que son diferentes
totaldias=length(diasunicos); %da el valor de la longitud del vector dia
medicionespordia=[]; %crea el vector vacío
promediopordia=[]; %crea el vector vacío

%Inicio del ciclo para el calculo del promedio por día
for k=1:totaldias
    undia=diasunicos(k); %Asocia la entrada k de diasunicos a undia
    indicesmediciones=find(Fechasdiarias==undia); %busca en Fechasdiarias los
que son iguales a undia y arroja el indice de esa entrada y la pone en
indicesmediciones
    estedia=length(indicesmediciones); % da la longitud de indicesmediciones
    cerospordia=[]; %crea el vector vacío

    % este ciclo toma el índice obtenido en indicesmediciones y busca el valor
del vector ceros que corresponde a ese indice y lo asigna al vector cerospordia
    for l=1:estedia
        cerospordia=[cerospordia,[Ceros(indicesmediciones(l))]];
        % el anterior comando es para hacer el promedio reducido, con la
temperatura reducida y la altura reducida
    end

    ppd=mean(cerospordia); %saca el promedio del vector cerospordia
    medicionespordia=[medicionespordia,[undia]]; %construye el vector
medicionporfecha que contiene las fechas sin las horas, a diferencia del vector
mediciones
    promediopordia=[promediopordia,[ppd]]; % construye un vector con los
promedios por dia

end
% fin del promedio diario

% PROMEDIO MENSUAL
% El programa agarra el promedio diario calculado arriba y sobre de eso hace el
promedio mensual
Fechasmensuales=floor(medicionespordia./100); %divide cada entrada del vector
Medicionespordia entre 100 y se queda con la parte entera para quedarse solo con
los meses y los años
mesesunicos=unique(Fechasmensuales); %lo mismo que para promedio diario
totalmeses=length(mesesunicos);
medicionespormes=[];
promediopormes=[];
desvest=[];

```

```

minimopormes=[];
maximopormes=[];

for m=1:totalmeses
    unmes=mesesunicos(m);
    indicesmensuales=find(Fechasmensuales==unmes);
    estemes=length(indicesmensuales);
    cerospormes=[];

    for n=1:estemes
        cerospormes=[cerospormes,[promediopordia(indicesmensuales(n))]];
    end

    maxpormes=max(cerospormes); %valor máximo por cada mes
    minpormes=min(cerospormes); %valor mínimo por cada mes
    ppm=mean(cerospormes);
    sd=std(cerospormes);
    medicionespormes=[medicionespormes,[unmes]];
    promediopormes=[promediopormes,[ppm]]; %construye el vector promediopormes
que tiene en cada entrada el promedio mensual de la isoterma cero
    desvest=[desvest,[sd]]; %construye un vector con las desviaciones
    maximopormes=[maximopormes,[maxpormes]]; %vector con el valor máximo por cada
mes
    minimopormes=[minimopormes,[minpormes]]; %vector con el valor mínimo por cada
mes

end
% fin del promedio mensual

%*****% 3. SALIDA DE RESULTADOS *****

file_id = fopen('todos_los_datos_esta_estacion.dat', 'a'); %Esta instrucción es
para abrir un archivo y escribir en él.

fprintf(file_id,"%i ",floor(FechasUnicas(1))); %Para imprimir el año

disp('Mínimo y su fecha')
min(Ceros) %Con esta instrucción se despliegan los datos en la pantalla y también
para que se vea si esta bien
FechaMin
fprintf(file_id,"%f ",min(Ceros)) %Esta imprime la salida de los datos en el
archivo que está abierto
fprintf(file_id,"%d ",FechaMin) %Esta instrucción imprime la fecha de estos datos.

disp('Máximo y su fecha')
max(Ceros)
FechaMax
fprintf(file_id,"%f ",max(Ceros))
fprintf(file_id,"%d ",FechaMax)

% Promedio anual tomando cada medición
disp('Promedio anual tomando cada medición y su desviación estándar')
mean(Ceros)
std(Ceros)
fprintf(file_id,"%f ",mean(Ceros)) % la media de Ceros, es la anual de todos
los datos

```

```

fprintf(file_id,"%f ",std(Ceros))      % la desviación de Ceros

% Promedio anual tomando el promedio diario
disp('Promedio anual tomando el promedio diario y su desviación estándar')
mean(promediopordia)
std(promediopordia)
fprintf(file_id,"%f ",mean(promediopordia))
fprintf(file_id,"%f ",std(promediopordia))

% Promedio anual tomando el promedio mensual
disp('Promedio anual tomando el promedio mensual y su desviación estándar')
mean(promediopormes)
std(promediopormes)
fprintf(file_id,"%f ",mean(promediopormes))
fprintf(file_id,"%f ",std(promediopormes))

%Promedio mensual de cada mes
file_mean_mes = fopen('promediopormes.dat', 'a');
disp('Promedio por cada mes')
promediopormes'
desvest'
for i=1:length(promediopormes)
    fprintf(file_id,"%f ",promediopormes(i))
    fprintf(file_mean_mes,"%f ",promediopormes(i))
end
for i=1:length(desvest)
    fprintf(file_id,"%f ",desvest(i))
end
fclose(file_mean_mes);

%Máximo por cada mes
file_max_mes= fopen('maximopormes.dat', 'a');
disp('Máximo por cada mes')
maximopormes'
for i=1:length(maximopormes)
    fprintf(file_id,"%f ",maximopormes(i))
    fprintf(file_max_mes,"%f ",maximopormes(i))
end
fclose(file_max_mes);

%Mínimo por mes
file_min_mes= fopen('minimopormes.dat', 'a');
disp('Mínimo por cada mes')
minimopormes'
for i=1:length(minimopormes)
    fprintf(file_id,"%f ",minimopormes(i))
    fprintf(file_min_mes,"%f ",minimopormes(i))
end
fclose(file_min_mes);

fprintf(file_id,"\n"); %Le inserta un salto de línea al archivo, para que la
siguiente vez que se abra ese archivo se comience a escribir desde la línea que le
sigue
fclose(file_id); %cierra el archivo abierto

end % fin del programa

```


Parte B: Distribución de los vientos

B.1 Introducción

1.1 Antecedentes

Los datos de vientos tienen diversos usos. Pueden tener aplicaciones en diversos campos del conocimiento, por ejemplo en vulcanología, glaciología, cambio climático, industria aeroespacial y por supuesto en meteorología. La meteorología es el campo de estudio que se encarga de estudiar el fenómeno de los vientos, como una de las variables necesarias para cumplir su objetivo principal que es el de conocer el estado del tiempo. En el campo del cambio climático se pueden medir cambios en direcciones preferenciales o afectación de rutas migratorias de aves por estos cambios. En la industria aeroespacial se usa para la construcción y planeación de aeropuertos.

En el campo de la vulcanología, la dirección del viento ayudar a modelar la caída de cenizas que se produce después de una erupción volcánica. Al ocupar el hombre espacios cada vez más cercanos a los volcanes, se vuelve más vulnerable ante los efectos de su actividad. La actividad eruptiva de pequeña magnitud incluso, puede tener efectos importantes sobre la vida humana y sus posesiones, así como la vida económica y social de quienes viven en sus cercanías.

La planeación urbana debe procurar un balance entre la extensión de las zonas habitacionales, industriales y zonas de infraestructura vitales, con el alcance probable de los productos volcánicos para mitigar sus efectos, o bien, desarrollar e implementar programas de contingencia con un conocimiento fundamentado y detallado de los volcanes y sus efectos. Por ejemplo, el área de influencia de las nubes de cenizas del Popocatepetl es muy grande, pero es necesario entender las condiciones de dispersión de las cenizas de acuerdo con la importancia de la actividad eruptiva y la época en que ésta pueda darse. Para hacerlo, es necesario analizar una componente de información importante son como los patrones de viento en la región central de México, con el fin de reconocer los peligros asociados con la lluvia de cenizas en esta zona y comprender las posibles trayectorias de productos balísticos y nubes de cenizas de acuerdo con los alcances verticales de las columnas eruptivas y en función de los vientos dominantes por época y nivel atmosférico [Delgado, 2001].

En el campo de la glaciología, se pueden usar los datos de la dirección y velocidad de viento para refinar los análisis de los procesos principales de un glaciar que son la ablación y la acumulación. El proceso de ablación se debe principalmente a la radiación solar, sin embargo, al ser el viento un proceso de transporte, puede contribuir de manera directa a la evaporación de un glaciar [Dadic, 2010].

1.2 Planteamiento del problema

Inicialmente, se pensó en procesar solo los datos correspondientes a la temperatura de la base de datos de los radiosondeos para determinar la altura de la isoterma 0 °C; sin embargo, durante la

realización de este trabajo fue claro que, con un programa computacional ligeramente diferente al escrito en un principio, era posible también analizar más variables dentro de la misma base de datos. De esa forma se podría tratar de refinar el modelo del retroceso glaciar de los volcanes mexicanos o se podría usar el análisis para tratar de resolver otros problemas asociados a los volcanes de México, principalmente el de la dirección de la caída de ceniza después de una erupción.

1.3 Hipótesis

a) La humedad en el aire, la dirección y la velocidad del viento son factores que contribuyen al proceso de desaparición de los glaciares. Específicamente, la falta de humedad no permite la acumulación de masa glaciar y el exceso de viento puede erosionar esta acumulación cuando la temperatura está cerca del punto de la transición de fase del agua.

Se inició el procesamiento de estos datos con el fin de incorporar el análisis de viento al análisis de temperatura de la sección anterior, aunque esta incorporación al modelo explicativo de desaparición glaciar sobrepasa esta tesis, por lo que únicamente se quedó en un muestreo estadístico de los vientos y la realización de una función de densidad de probabilidad circular.

b) Además, los datos de viento son cruciales en la modelación de la caída de ceniza volcánica. En particular, el programa Ashfall necesita varios archivos de entrada para poder hacer un análisis, entre los que se encuentra un archivo que contenga los datos de viento por lo que estos datos limpios podrían servir a este propósito.

1.4 Objetivos

Objetivo principal

Hacer un programa para procesar la base de datos de radiosondeo para generar una estadística simple de los vientos y una distribución de probabilidad circular con la particularidad de poder hacerlo para cualquier estrato de altitud deseado sobre las estaciones de radiosondeo en cuestión.

Objetivos secundarios

- Usar esta nueva base de datos de los vientos generada para conjuntarla con los resultados de la temperatura y así obtener un análisis más refinado del retroceso glaciar.
- Usar esta base de datos para generar archivos que pueda utilizar el programa Ashfall para el modelado de cenizas volcánicas.

1.5 Metodología

De la misma base de datos descrita en la sección A.3 de esta tesis, se obtuvieron los datos crudos de viento que se procesaron. Se usaron los datos ya limpios generados por el programa descrito en el apéndice A.2 y a partir de ahí se reorganizó la base de datos para su posterior análisis.

Primero, se hizo un programa con instrucciones de Shell para dividir la base de datos limpia en archivos que contuvieran los datos correspondientes a un mismo mes para todos los años

diferentes, es decir, en total se obtuvieron 12 archivos por estación de radiosondeo que corresponden una a cada mes del año.

Se hizo, entonces, un segundo programa en Octave o Matlab que toma como entrada los datos por meses y que genera un análisis estadístico simple de la distribución angular y altitudinal de los vientos para cada mes del año y para cada estación. Estos datos son complicados de visualizar, por lo que se tuvo que crear un histograma cilíndrico con este único propósito y se descubrió que ambos lenguajes de programación no tenían ninguna función para esto, por lo que fue una contribución nueva que tiene licencia libre para su uso con Matlab.

Los histogramas cilíndricos no se pueden visualizar de la mejor manera en esta tesis por las limitaciones de las imágenes estáticas en dos dimensiones. De hecho solo se incorporaron dos ejemplos de los resultados obtenidos.

Además, se escribió un programa que ajusta los datos a una función densidad de probabilidad para la distribución von Mises. Este tercer programa arroja las gráficas de la función y también los valores de los parámetros, tanto el valor de la media como el valor del parámetro de concentración.

Debido a la utilidad de estos datos en la modelación de caída de cenizas, se ayudó a varios estudiantes con software similar hecho a la medida para obtener datos que pudiera procesar el programa Ashfall con el cual hicieron sus respectivas tesis. Todos estos programas se encuentran en los apéndices B.6 al B.9.

B.2 Marco teórico

2.1 Patrones de viento

Los vientos son influencias importantes en diversos fenómenos naturales, por ejemplo los patrones climáticos, la producción de las olas del mar, la formación de desiertos, etc. El viento es el resultado de cualquier influencia que crea diferencias en la presión atmosférica.

En la Tierra, los patrones de vientos globales están influenciados por varios factores. En primer lugar, la rotación del planeta crea rotaciones de células de baja presión en sentido antihorario en el hemisferio norte y la correspondiente rotación horaria en el hemisferio sur (efecto Coriolis). En segundo lugar, la influencia del calentamiento de las corrientes marinas y la captura atmosférica del calor solar. En tercer lugar, las células de convección crean gradientes de baja presión en regiones como el ecuador, altas presiones a 30 grados norte y sur (donde están los desiertos), zonas de baja presión a 60 grados al norte, y por último zonas de alta presión en los polos.

A nivel regional, los vientos pueden crearse por procesos adiabáticos tales como los vientos cargados de humedad que viajan sobre cuerpos de agua que llegan a tierra, y la evaporación regional y precipitación de la humedad, lo que conduce a dramáticos ciclos húmedos-secos estacionales, como los monzones en la India y el sudeste asiático [Lutgens y Tarbuck, 2000].

2.1.1 Patrones de viento en México

Los patrones de viento ya son conocidos en las regiones de estudio. En particular en el centro del país en dónde además de los aeropuertos se monitorean las condiciones que aumentan o disminuyen la calidad del aire en lo que ahora se denomina “la megalópolis”.

Una de las características de la meseta central de la República Mexicana es que en niveles altos los vientos casi no cambian ni en magnitud ni en dirección sobre la región, y en escala diurna cambian poco, aunque a lo largo del año sí se observan cambios muy importantes. Conforme se analizan los vientos en niveles más cercanos a la superficie, los vientos tienen variaciones muy grandes de una región a otra y a lo largo del día. La orografía y las diferentes alturas sobre el nivel del mar de los valles, la presencia de varias sierras y diferente uso de suelo van generando diversos procesos físicos que provocan esta compleja variabilidad espacial y temporal de los vientos [Delgado, 2001].

2.1.2 Patrones de viento en las cercanías de los volcanes

Estudios previos de la zona muestran que en altitudes menores a 5500 m s.n.m. los vientos de enero a diciembre son prácticamente aleatorios, aunque existen dos patrones de viento incipientes: uno es persistentemente del oeste ($250^{\circ}\sim 300^{\circ}$) de enero a abril y el otro, de junio a diciembre, proviene del noreste ($20^{\circ}\sim 60^{\circ}$). Aunque en noviembre y diciembre vuelven a aparecer los vientos provenientes del suroeste y del oeste. Entonces, los vientos soplan del oeste

de enero a abril y del noreste de junio a octubre. Mayo, noviembre y diciembre son los meses con mayor dispersión de vientos.

Por otro lado, los vientos que soplan arriba de los 5500 m s.n.m. muestran una mayor regularidad. De enero a mayo, los vientos provienen del oeste ($250^{\circ}\sim 270^{\circ}$), aunque en mayo también se observan vientos provenientes del oriente ($90^{\circ}\sim 100^{\circ}$) pero con mayor frecuencia. De junio a octubre los vientos que predominan son del oriente ($80^{\circ}\sim 100^{\circ}$), aún cuando se tienen máximos relativos del oeste y del norte. Los vientos en noviembre y diciembre soplan de nuevo del oeste (250°). Entonces, los vientos altos soplan del oeste de noviembre a abril, del este de junio a septiembre y los meses de mayo y octubre son de transición entre ambos patrones [INECC, 2015].

2.1.3 Estratificación de los vientos

Estratificar los vientos cada cierto intervalo es muy importante en los análisis de caída de cenizas, pues en general existen vientos cizallantes. Los vientos cizallantes se definen como la variación del vector de viento o una de sus componentes en una dirección dada. En general se pueden expresar en términos de la derivada parcial del vector de viento con respecto a una de sus componentes [Stull, 2015]. Dependiendo de si el gradiente de la velocidad se encuentre a distintas alturas, la cizalladura puede ser vertical u horizontal. Para este trabajo no se incluyó ningún parámetro para cuantificar la cizalladura vertical.

Para los modelos y programas computacionales de caída de cenizas, las diferentes direcciones del viento por nivel son importantes como datos de entrada de la modelación. Las cenizas ascienden dependiendo de su tamaño y su alcance horizontal se relaciona con la altura que alcanzan y la dirección y la velocidad del viento a esa altura específica. Las partículas de ceniza más pequeñas alcanzan una altura mayor y su dirección puede variar con respecto de las cenizas más grandes.



Figura 1. La estratificación de los vientos se puede ver gracias a las cenizas de esta erupción del Popocatépetl en el año 2011 [Rivera, 2011].



Figura 2. Otra vista de la estratificación de los vientos. Conforme la fumarola sube, los vientos la mueven en diferentes direcciones que no son necesariamente opuestas o contrarias angularmente [La Vanguardia, 2019].

2.2 Estadística direccional

La estadística direccional (también llamada estadística circular o estadística esférica) es una rama de la estadística que se ocupa de los eventos en variedades de Riemann compactas. Existen varias distribuciones de probabilidad direccional: von Mises, von Mises-Fischer, normal envuelta, Cauchy envuelta, Laplace envuelta.

La estadística circular se sitúa entre la estadística lineal y la estadística esférica. Algunos aspectos del tema parecen triviales en comparación. Una muestra de datos lineales puede ser dispuesto como una colección de clústeres, colas largas, valores típicos y atípicos sobre un intervalo indefinidamente largo de la recta real tal que ninguna pantalla pueda mostrar todas las características. Una muestra de datos esféricos puede estar muy dispersa sobre la superficie de la esfera como grupos modales, valores típicos que solo se puede ver en una pantalla tridimensional. En cambio, los datos circulares no pueden estar muy alejados entre ellos (la noción de valor atípico tiene pocas consecuencias en la mayoría de las situaciones prácticas) y no se puede ocultar. Así que muchas de los problemas básicos en la estadística lineal y esférica no existen en los datos circulares.

El problema de obtener información práctica de datos circulares podría parecer seductoramente cercano al mismo problema en datos lineales, especialmente en conjuntos de datos concentrados (p.ej. conjuntos de datos contenidos en un área pequeña del círculo). Aproximar linealmente un pequeño arco parecería justificar la aplicación de métodos lineales y así mismo parecería innecesario un análisis especial de datos circulares.

Ambas observaciones son superficiales. Un problema básico que ocurre con las orientaciones geológicas es decidir cuántos grupos modales distintos se manifiestan en una sola muestra de datos. La finitud del círculo crea nuevos problemas así como resuelve otros. Y mientras que las aproximaciones lineales pueden resolver problemas de análisis de datos *ad hoc*, no son apropiados para procesamiento de datos reales. El problema común que surge al automatizar un resumen de datos de la dirección del viento ocurre precisamente por esta razón [Fischer, 1993].

2.2.1 Estadística circular descriptiva

Los histogramas son importantes para visualizar la información. Hay muchas razones para visualizar la información:

- Para obtener una idea inicial de las características importantes de la muestra. Por ejemplo si la muestra parece ser de una distribución isotrópica, unimodal o multimodal
- Para enfatizar estas características.
- Para sugerir modelos para los datos, como por ejemplo un modelo de von Mises para una muestra que parece dibujarse a partir de una distribución unimodal simétrica.
- Para tratar de evitar cometer errores: recordarle a los estudiantes de modelación climática que antes de hacer un pronóstico hay que asomarse por la ventana.

Principalmente, existen dos formas de visualizar la información: los histogramas lineales y los angulares. Los lineales se contruyen como si los datos fueran lineales. Se elige un punto de inicio y se agrupan en celdas de cierto número de ángulos. De esta forma se hace un histograma de la forma usual.

Los histogramas angulares se pueden representar como sectores circulares alrededor del centro del círculo con el radio de cada sector diferente lo que indica la frecuencia del evento en ese sector.

Para presentar los datos se puede hacer uso de los histogramas. Hay varios puntos a considerar en relación a la presentación de estos:

- Los histogramas son fáciles de construir. En particular, casi cualquier programa estadístico puede producir un histograma lineal.
- Los histogramas lineales involucran una elección arbitraria del punto de inicio. Este defecto se puede corregir al repetir un ciclo completo del histograma.
- Más importante, el uso de los histogramas involucran una elección arbitraria de celda o de los límites para cada grupo. Una elección desafortunada de los límites podría resultar en una serie distorsión de la información en la muestra sobre el número, tamaños y ubicaciones de los grupos modales.
- La otra elección que se debe hacer es el ancho de cada celda.
- El punto clave es que la principal virtud de un imagen de tipo histograma es la simplicidad de su construcción. [Fischer, 1993]

2.2.2 Distribuciones de probabilidad de máxima entropía

Si queremos asignar probabilidades a un fenómeno y no vemos ninguna razón para que el resultado ocurra más frecuentemente que otro, entonces a los eventos se les asigna probabilidades iguales. Esto se llama *principio de razón insuficiente*. Si conocemos algo acerca de la no uniformidad de los resultados, hay una extensión del principio anterior que se llama *principio de máxima entropía*.

Para una distribución de probabilidad discreta p , en el conjunto numerable $\{x_1, x_2, \dots\}$, con $p_i = p(x_i)$, la entropía de p se define como

$$h(p) = - \sum_{i \geq 1} p_i \log(p_i). \quad (1)$$

Para una función de densidad de probabilidad continua, sobre un intervalo I , definimos la entropía como

$$h(p) = - \int_I p(x) \log(p(x)) dx, \quad (2)$$

con $0 \log 0 = 0$. El principio de máxima entropía maximiza estas funciones (derivada igual a cero) bajo restricciones específicas que dan lugar a diferentes funciones de probabilidad. Aunque este procedimiento no es trivial, no es el objeto de este trabajo, por lo que no se hace explícito.

Esta definición de entropía, introducida por Shannon, nos recuerda a la fórmula para la noción termodinámica de la entropía (introducida antes por Boltzmann). Físicamente, se espera que los sistemas evolucionen a estados con más alta entropía. En nuestro contexto probabilístico, $h(p)$ se ve como una medida de la información llevada por p , con una entropía más alta que corresponde a menor información (más incertidumbre o más ausencia de información) [Conrad, 2018].

2.2.2.1 Distribución de von Mises o de Tikhonov

Es una distribución circular de probabilidad de máxima entropía. Es una de las distribuciones de probabilidad en estadística direccional (también llamada estadística circular o estadística esférica). Esta es una distribución simétrica unimodal que es el modelo más común para muestras unimodales de datos circulares. En varios aspectos, la distribución de von Mises es el análogo de la distribución normal en la recta real. En la práctica, parece ser un modelo razonable para conjuntos de datos simétricos unimodales que aparecen en varias áreas de aplicación.

La función de densidad de probabilidad de von Mises es

$$f(\theta) = [2\pi \times I_0(\kappa)]^{-1} \exp[\kappa \cos(\theta - \mu)] \quad 0 \leq \theta < 2\pi, 0 \leq \kappa < 2\pi \quad (3)$$

en donde μ es la media, κ es el parámetro de concentración (una medida recíproca de la dispersión) y

$$I_0(\kappa) = (2\pi)^{-1} \int_0^{2\pi} \exp[\kappa \cos(\phi - \mu)] d\phi \quad (4)$$

es la función modificada de Bessel de primer tipo de orden cero [Fischer, 1993]. Si κ es pequeña la distribución se hace uniforme y si κ es grande la distribución se concentra alrededor de μ .

B.3 Procesamiento de los datos

Como ya se mencionó, para esta sección se usó exactamente la misma base de datos que se explica en la sección A.3 de esta tesis que es la reportada en la referencia [NOAA-ESRL, 2018].

Como se indica en la sección A.4.1, se realizaron varios códigos computacionales que son la base de este trabajo. La base de datos completa consiste de 15 estaciones, con dos mediciones diarias por estación, con 8 datos por medición y con 40 años de mediciones en promedio, para un aproximado de quinientos millones de datos. La base de datos tenía muchos errores de origen. Uno de los programas se hizo para limpiarla, luego fue contrastada contra la misma base de datos que fue limpiada manualmente. Todo esto se hizo específicamente para la información de las temperaturas de esta base de datos. Para la parte de los vientos, también se limpió la base de datos, pero no hubo forma de contrastarla contra la misma base de datos limpiada por otro método, aunque sí hubo la posibilidad de contrastar los resultados con los de otros trabajos previos.

Una vez que se tomaron los archivos ya transformados por el programa creado para las temperaturas como se explica en la sección A.4.2, se procesaron los datos de viento esencialmente con otros dos programas creados específicamente con este propósito. El primer programa es una serie de instrucciones en *shell* para partir la base de datos y acomodarla en un archivo diferente para cada mes de la medición, es decir, en total 12 archivos separados. La razón es que el programa de análisis principal se ejecuta mejor cuando ya tiene los datos de entrada divididos de esta forma. Estas instrucciones se pueden encontrar en el apéndice B.1 y en el B.2.

Una vez reordenada la base de datos, se puede introducir en el segundo y tercer programa para su análisis (se pueden consultar en el apéndice B.3 y B.5). El programa del apéndice B.3 realiza una estadística circular simple de los datos por encima del nivel de la atmósfera a diferentes alturas y arroja un histograma cilíndrico que solo se puede ver como una animación GIF o en formato de video. También se puede visualizar como imagen estática pero se pierde un poco la perspectiva. La ejecución de este programa es tardada –la versión completa, que hace el cálculo desde la altura de la estación meteorológica hasta 30 mil metros, tarda aproximadamente 45 minutos por cada archivo– por lo que es importante esperar hasta que termine. No fui capaz de reducir el tiempo de ejecución del programa, aunque seguramente es posible. Si solo se calcula un estrato de altitud, el programa puede tardar mucho menos, máximo 2 minutos.

El programa del apéndice B.5 ajusta los datos reales a una distribución de probabilidad de von Mises. Este programa arroja la gráfica y los parámetros de esta distribución y está hecho para correr en Matlab o en Octave. Este programa es mucho más rápido en su ejecución.

Al ejecutarse, ambos programas (B.3 y B.5) van a solicitar cierta información al usuario para que este acote o refine el análisis. El primer dato que necesita ingresar el usuario será la altura más baja desde la cual se quiere hacer el análisis. Esta altura puede ser el valor en metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.) del nivel del terreno al que está la estación, es decir, para el caso de la Ciudad de México se puede introducir un valor de 2230 metros. Si se conoce la altura exacta a la que está la estación de radiosondeo en esta ciudad en específico también se puede introducir. También se puede poner una altura más alta, por ejemplo la altura a la cual está la base del

volcán, o se puede introducir cualquier otra altura según sea necesario.

En la segunda entrada se puede poner la altura máxima hasta la que se quiere hacer el análisis, según las necesidades de la medición. La altura máxima por defecto del programa es de 35000 metros, aunque en la práctica los globos de radiosondeo alcanzan cuando mucho 31000 metros, que es aproximadamente a la mitad de la estratósfera.

Un análisis más preciso de la dirección predominante del viento, se puede lograr si se estratifica la atmósfera cada cierta cantidad de metros y se hace una estadística para cada estrato, pues las direcciones de los vientos pueden cambiar en pocos metros. Es por esto que en la tercera entrada hay que especificar el intervalo de altitud en metros en el que se quiere estratificar los vientos. En esta tesis solo se utilizó un estrato de 1000 metros, aunque el programa es capaz de aceptar modificaciones a esa cantidad. Entre más estratos haya que calcular, más tiempo tardará el programa, pues necesita hacer un render del histograma cilíndrico punto a punto.

Además, para la estadística circular, se requiere dividir el plano en sectores angulares iguales de cierto número de grados para poder cuantificar las direcciones del viento preferentes para cada estrato de altura. En este caso se tomaron sectores circulares de 30° por defecto para todos los cálculos, aunque este número puede ajustarse directamente en el programa al momento de su ejecución.

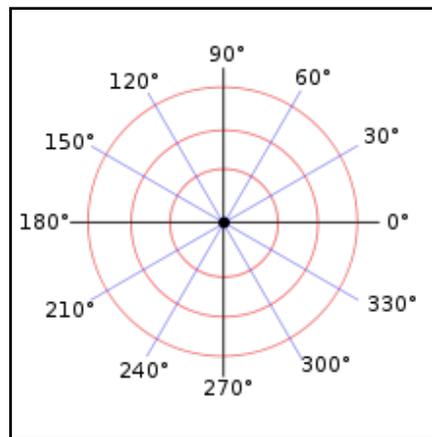


Figura 3. Círculo con división polar de sectores circulares de 30° .

El primer programa de análisis arroja un archivo que contiene la altura del intervalo, luego arroja la probabilidad de cada sector circular a esa altura y hace lo mismo para cada altura. También arroja dos gráficas. Ambas gráficas contienen los mismos datos pero representados de dos maneras distintas. La primera es un histograma bidimensional de los datos y la segunda es un histograma cilíndrico. La segunda es una mejor representación, sin embargo, solo es posible visualizarlo en forma de video o de archivo GIF. Hay que recordar que en el caso de los datos meteorológicos, el 0° indica que el viento proviene del norte verdadero. Además, los datos se leen en sentido horario, al contrario de la convención matemática más usada que es en sentido antihorario [Stull, 2015]. En todos los casos se usó la convención meteorológica.

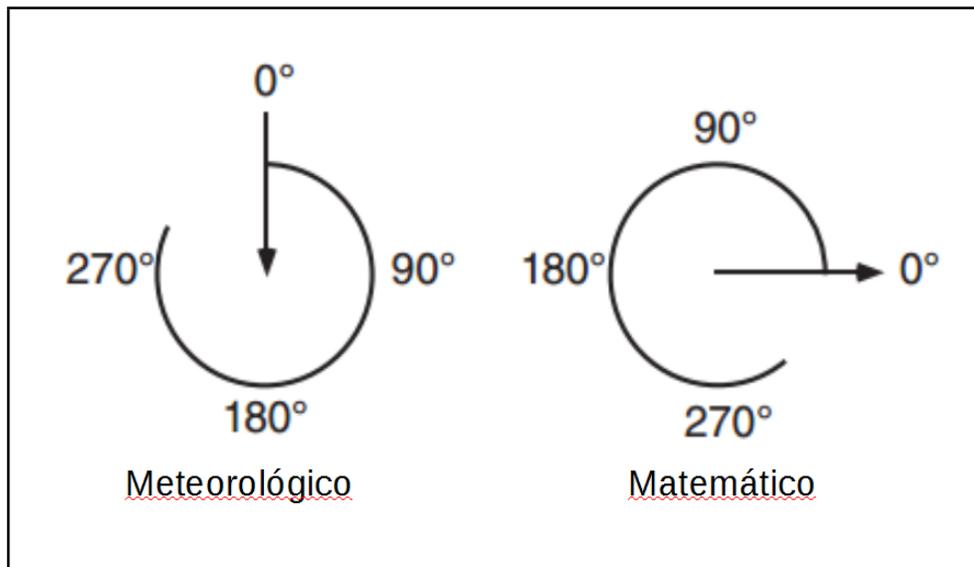


Figura 4. Convención de ángulo de los vientos.

Mientras que el programa B.3 solo arroja las gráficas del histograma, el programa B.5 arroja el valor de la integral modificada de Bessel de orden cero, la media de los datos y el parámetro de concentración de la función densidad de probabilidad de von Mises para cada estrato de altitud.

En resumen, ¿cómo trabajan los programas?

Entrada

- Archivo con datos de un solo mes
- La altura desde la cual se quiere calcular
- La altura hasta la cual se quiere calcular
- El valor del tamaño del intervalo altitudinal
- El sector angular de división uniforme del campo de vientos

Salida

- Archivo de texto en el formato que pide Ashfall (en caso de ser necesario)
- Histograma bidimensional de los resultados
- Histograma tridimensional de los resultados
- Estadística simple de la probabilidad del viento por sector circular
- Valores de los parámetros generales de la función densidad de probabilidad de von Mises
- Gráfica de la distribución de von Mises en formato polar y cartesiano

B.4. Resultados

Se hicieron siete programas en total para procesar diferentes bases de datos todas relacionadas con vientos. El primer programa que se hizo fue específicamente para generar archivos con extensión .WIN que forman parte de los datos de entrada del programa Ashfall que se usa para modelación de cenizas. Este primer programa se expuso en el VI Congreso Nacional de Investigación Estudiantil del Instituto Politécnico Nacional en el que se obtuvo el primer lugar en exposición oral [Téllez, 2011].

A continuación se muestran algunas (no todas) las gráficas y las tablas con los resultados obtenidos mediante los programas posteriores escritos para el análisis de vientos. La base de datos de los resultados es muy grande y se consideró innecesario reportar todas las estadísticas correspondientes a cada mes. Las gráficas generadas pueden ser tantas y tan variadas como se deseé, puesto que los programas permiten ajustar diversos parámetros para un mejor análisis.

Primero se presentan 2 gráficas que representan la misma base de datos (estadística para el mes de junio, estación 679 Aeropueto-Tacubaya, desde 2000 m s. n. m. hasta 30000 m s. n. m.), aunque de dos formas distintas. La primera representa la base de datos en forma de un histograma cartesiano [Téllez, 2011]. La segunda representa la base de datos en forma de un histograma cilíndrico. El segundo es más intuitivo pues da una perspectiva de la dirección tridimensional, sin embargo es mejor si se le ve en forma de animación en video. Se consideró innecesario mostrar las gráficas correspondientes a la estación 692 Veracruz puesto que los resultados son muy similares entre las dos estaciones.

Después se presentan dos gráficas más que son la misma base de datos anterior, pero acotada entre 5500 m s.n.m y 10500 m s. n. m. Se acotó de esta forma pues este rango de alturas es en donde tienen más influencia las fumarolas del volcán Popocatepetl y se puede ver de forma intuitiva un posible comportamiento de estos fenómenos.

Finalmente se presentan 2 gráficas para cada mes para cada estación para un total de 48 gráficas. La primer gráfica muestra la función de densidad de probabilidad circular de von Mises para los vientos entrantes en un estrato desde 5500 m s. n.m hasta 6500 m s.n.m. Junto con esta gráfica se muestran los parámetros de construcción que se tienen que introducir en la ecuación (n) de la sección anterior para obtener los resultados. La segunda gráfica es un histograma circular que muestra la misma base de datos anterior pero con los sectores circulares divididos en 30° . Junto con esta gráfica se muestra una tabla con la probabilidad simple para cada sector circular.

En la sección en que se exponen las gráficas de la estación 692 de Veracruz se omitieron los parámetros de la función de densidad de probabilidad de von Mises y también las probabilidad simples para cada sector circular. La razón de esto es que son muy similares con los reportados para la estación de Tacubaya.

Los resultados obtenidos coinciden con lo que ya se sabía de los vientos de la zona, tanto en las zonas bajas donde hay turbulencia por las montañas como en las zonas altas en donde los vientos son más constantes en cuanto a su dirección.

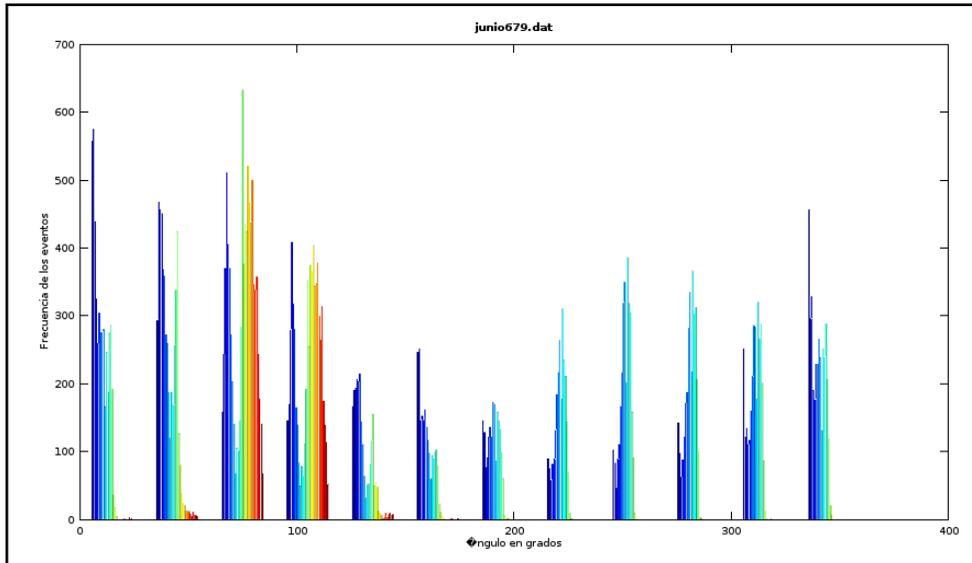


Figura 5. Histograma cartesiano de la distribución de la dirección del viento en el mes de junio para la estación Tacubaya-Aeropuerto. Cada grupo de datos representa un sector circular de 30° . Cada color representa un estrato de altura de 1000 metros ascendente de izquierda a derecha o, lo que es lo mismo, de azul a rojo. Estos estratos van desde 2000 m s. n. m. hasta 30000 m s. n. m. [Téllez,2011].

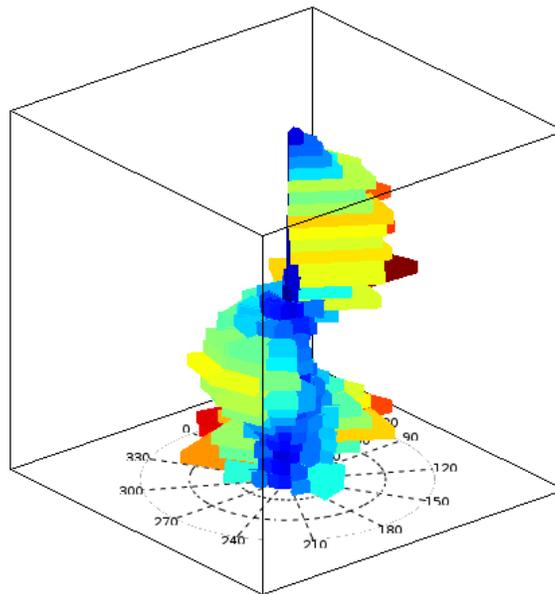


Figura 6. La misma base de datos de la figura 5 (junio en la estación Tacubaya-Aeropuerto), pero representada como un histograma cilíndrico. Los colores solo son para visualizar mejor la cantidad de cuentas en la estadística: azul representa pocas cuentas, rojo representa un número mayor. En el plano horizontal se encuentra la dirección dividida en sectores circulares de 30° . En el eje z están los estratos de 1000 metros y van de 2000 m s. n. m. hasta 30000 m s. n. m. La dirección predominante varía con la altura [Téllez, 2015].

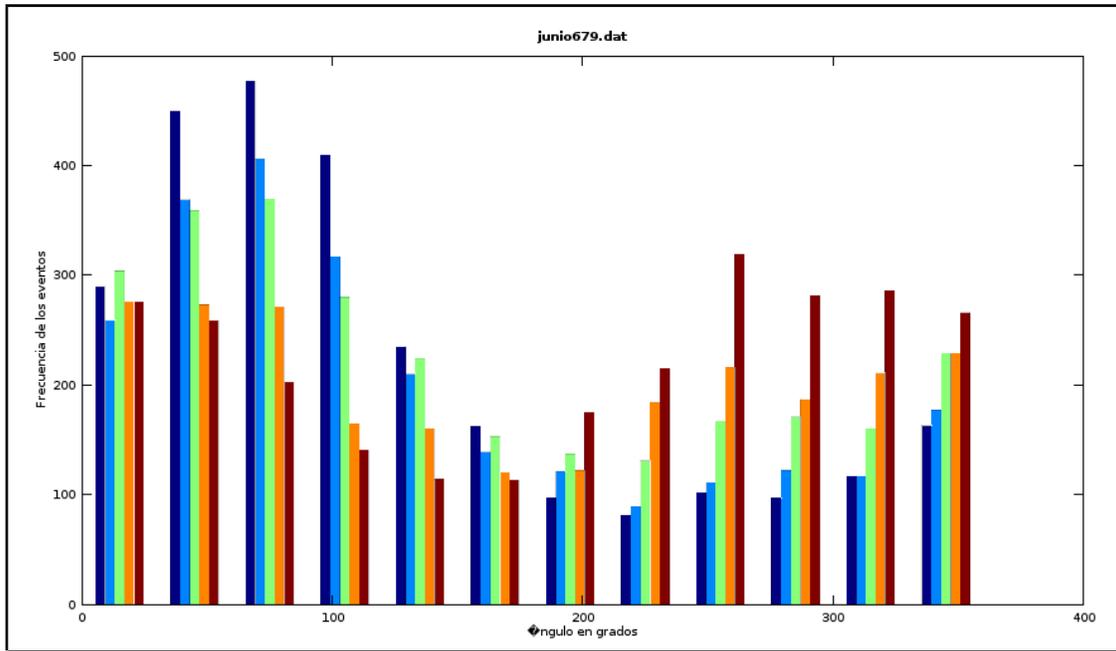


Figura 7. Misma base de datos de la figura 5. Cada grupo representa un sector circular de 30°. Cada color representa un estrato de altura de 1000 metros ascendente de izquierda a derecha o de azul a rojo. Estos estratos van desde 5500 m s. n. m. hasta 10500 m s. n. m. [Téllez, 2011].

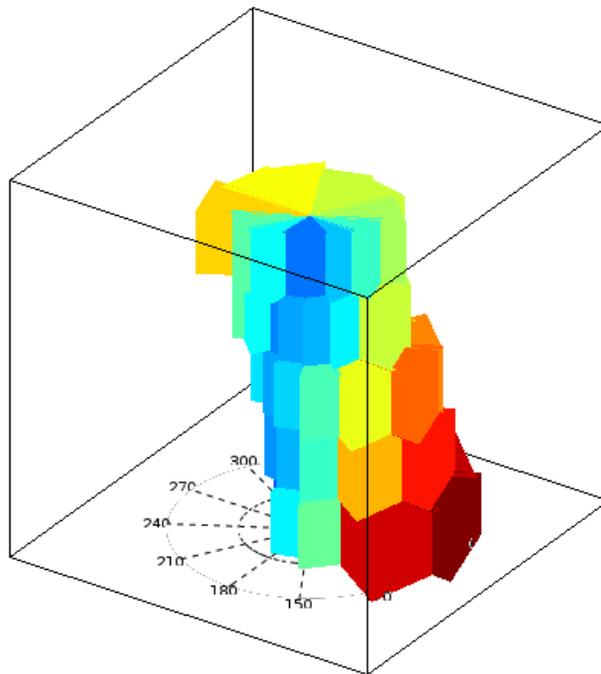


Figura 8. Misma base de datos que la figura 5 y mismo histograma de la figura 7, pero representado como cilindro. Los colores solo son para visualizar mejor la estadística: azul representa pocas cuentas y rojo representa un número mayor. Son 5 estratos de 1000 metros cada uno y van desde 5500 m s. n. m. hasta 10500 m s. n. m. [Téllez, 2015].

4.1 Estación Tacubaya-Aeropuerto

Se presentan 2 gráficas para cada mes para cada estación para un total de 48 gráficas, 24 para la estación 679 Tacubaya-Aeropuerto y 24 para la 692 de Veracruz. La primera gráfica es la distribución de probabilidad de von Mises de los vientos entrantes para cada mes y se reportan sus parámetros asociados. La segunda gráfica es un histograma circular que contiene las direcciones preferenciales del viento entrante de 5500 m s. n. m. hasta 6500 m s. n. m. para cada mes. Se reportan las probabilidades de dirección para cada sector circular. Los colores solamente sirven para visualizar mejor las gráficas.

Enero

Figura 9. Distribución de von Mises.

Parámetros de la distribución

Ángulo medio (radianes) = -1.9568

Ángulo medio (grados) = -112.11

kappa = 1.7905

Bessel cero = 0.080499

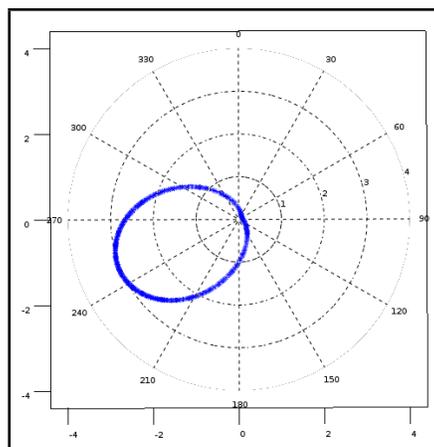
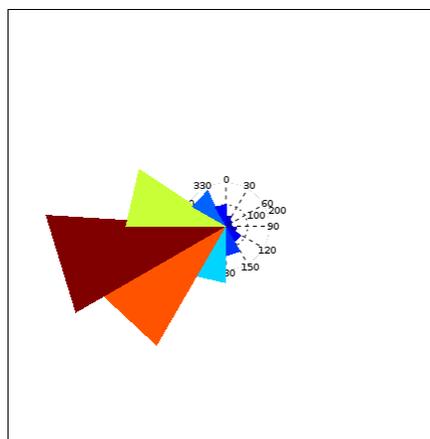


Figura 10. Probabilidad por sector circular
Tabla 1. Datos de la figura 10.

Sector circular (grados)	Probabilidad
30	0.0166185
60	0.0122832
90	0.0097543
120	0.0162572
150	0.0339595
180	0.0422688
210	0.0899566
240	0.2359104
270	0.2901012
300	0.1571532
330	0.0625000
360	0.0332370



Febrero

Figura 11. Distribución de von Mises.

Parámetros de la distribución
 Ángulo medio (radianes) = -1.8117
 Ángulo medio (grados) = -103.80
 $\kappa = 1.7298$
 Bessel cero = 0.083759

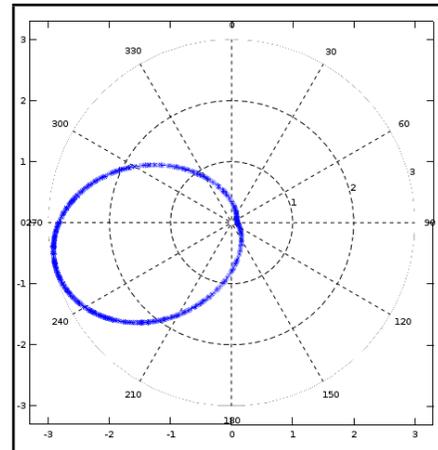
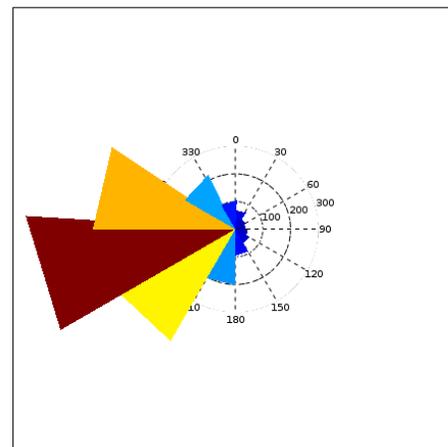


Figura 12. Probabilidad por sector circular
 Tabla 2. Datos de la figura 12.

Sector circular (grados)	Probabilidad
30	0.024662
60	0.014718
90	0.013126
120	0.017104
150	0.022275
180	0.036595
210	0.076770
240	0.192522
270	0.302705
300	0.188544
330	0.074781
360	0.036197



Marzo

Figura 13. Distribución de von Mises.

Parámetros de la distribución
 Ángulo medio (radianes) = -1.7226
 Ángulo medio (grados) = -98.695
 $\kappa = 1.6152$
 Bessel cero = 0.090090

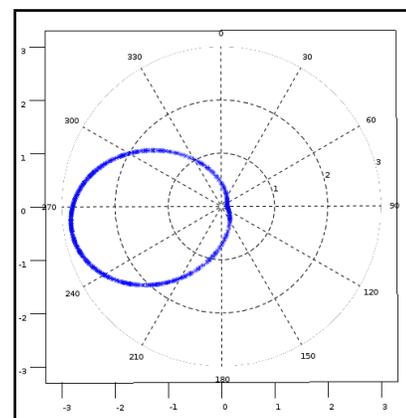
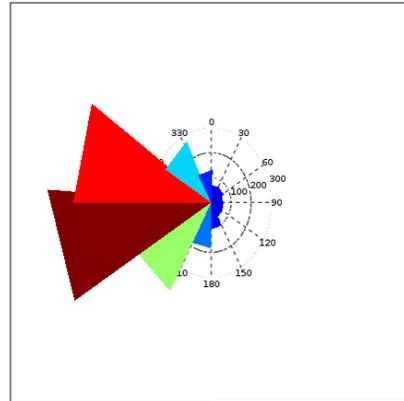


Figura 14. Probabilidad por sector circular
 Tabla 3. Datos de la figura 14.

Sector circular (grados)	Probabilidad
30	0.023256
60	0.023256
90	0.018247
120	0.019320
150	0.025403
180	0.032558
210	0.063685
240	0.153488
270	0.290161
300	0.228623
330	0.082290
360	0.039714



Abril

Figura 15. Distribución de von Mises.
 Parámetros de la distribución.
 Ángulo medio (radianes) = -1.4549
 Ángulo medio (grados) = -83.361
 $\kappa = 1.1983$
 Bessel cero = 0.11429

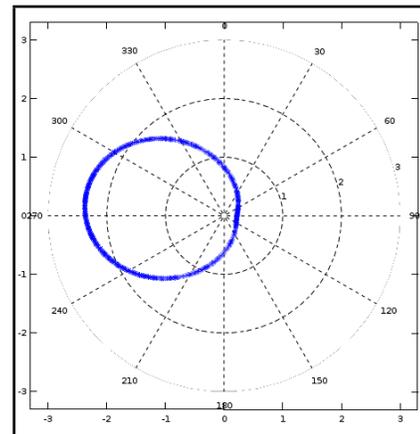
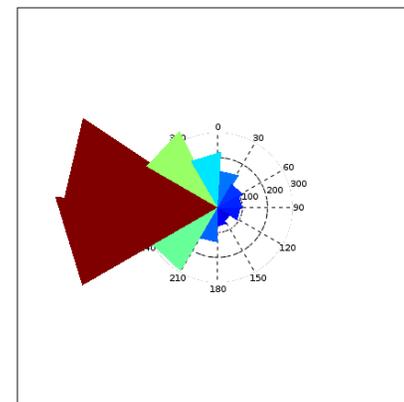
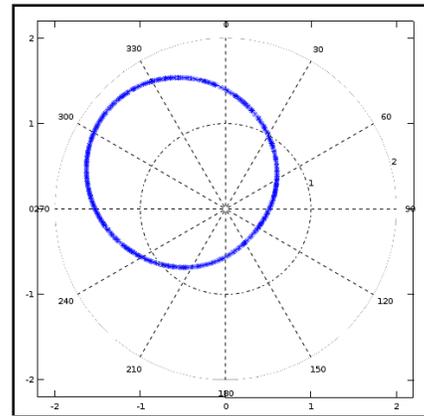


Figura 16. Probabilidad por sector circular
 Tabla 4. Datos de la figura 16.

Sector circular (grados)	Probabilidad
30	0.050292
60	0.037901
90	0.036443
120	0.028061



150	0.023324
180	0.024781
210	0.049563
240	0.111880
270	0.232872
300	0.224854
330	0.114067
360	0.065962



Mayo

Figura 17. Distribución de von Mises.

Parámetros de la distribución

Ángulo medio (radianes) = -0.87702

Ángulo medio (grados) = -50.250

kappa = 0.71053

Bessel cero = 0.14081

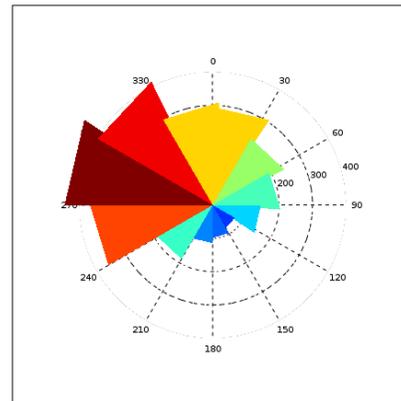


Figura 18. Probabilidad por sector circular

Tabla 5. Datos de la figura 18

Sector circular (grados)	Probabilidad
30	0.097118
60	0.077552
90	0.065457
120	0.047670
150	0.028815
180	0.032373
210	0.042334
240	0.073639
270	0.134116
300	0.166133
330	0.134116
360	0.100676

Junio

Figura 19. Distribución de von Mises.

Parámetros de la distribución.

Ángulo medio (radianes) = 1.2276

Ángulo medio (grados) = 70.335

kappa = 0.91462

Bessel cero = 0.13042

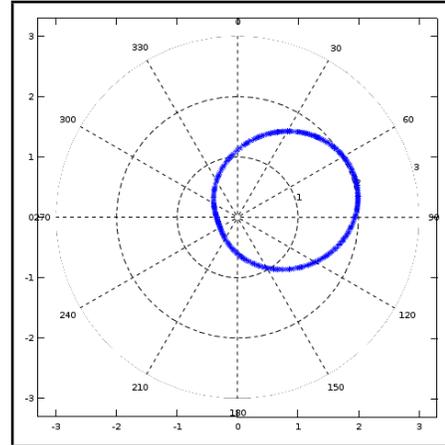
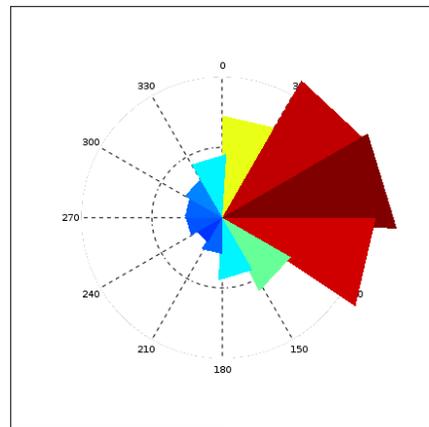


Figura 20. Probabilidad por sector circular

Tabla 6. Datos de la figura 20.

Sector circular (grados)	Probabilidad
30	0.109064
60	0.163596
90	0.181651
120	0.144805
150	0.089167
180	0.060796
210	0.036109
240	0.032424
270	0.039425
300	0.035741
330	0.044215
360	0.063007



Julio

Figura 21. Distribución de von Mises.

Parámetros de la distribución

Ángulo medio (radianes) = 1.7521

Ángulo medio (grados) = 100.39

kappa = 1.6200

Bessel cero = 0.089820

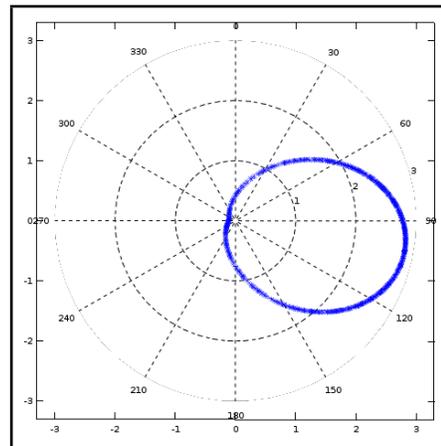
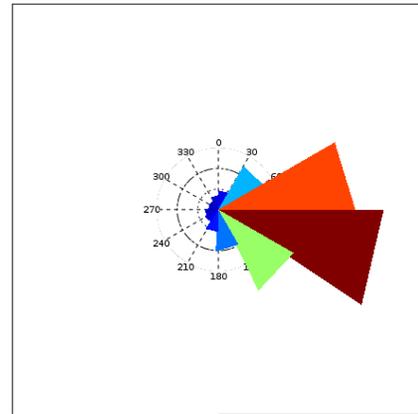


Figura 22. Probabilidad por sector circular
 Tabla 7. Datos de la figura 22.

Sector circular (grados)	Probabilidad
30	0.036188
60	0.088857
90	0.237549
120	0.275528
150	0.152992
180	0.065926
210	0.037979
240	0.026514
270	0.021498
300	0.017198
330	0.016482
360	0.023289



Agosto

Figura 23. Distribución de von Mises.
 Parámetros de la distribución.
 Ángulo medio (radianes) = 1.6690
 Ángulo medio (grados) = 95.627
 kappa = 1.9843
 Besselcero = 0.070585

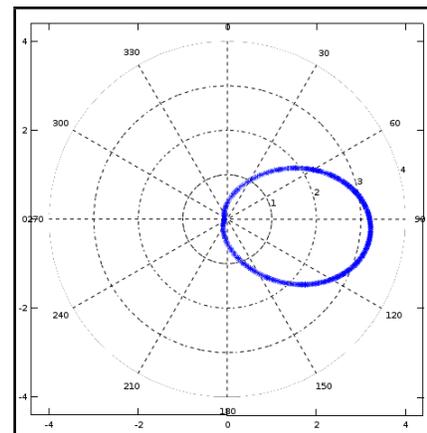
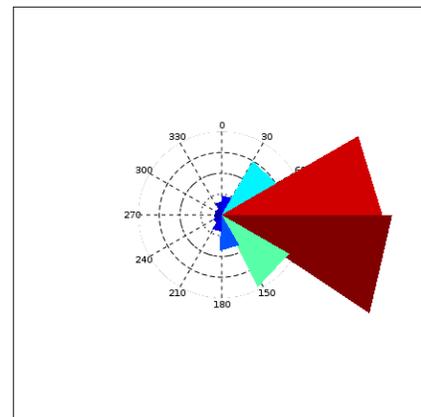


Figura 24. Probabilidad por sector circular
 Tabla 8. Datos de la figura

Sector circular (grados)	Probabilidad
30	0.036075
60	0.110029
90	0.274531
120	0.283550



150	0.138528
180	0.055916
210	0.028860
240	0.017316
270	0.012626
300	0.011183
330	0.010101
360	0.021284

Septiembre

Figura 25. Distribución de von Mises.

Parámetros de la distribución

Ángulo medio (radianes) = 1.5358

Ángulo medio (grados) = 87.993

kappa = 1.4058

Bessel cero = 0.10212

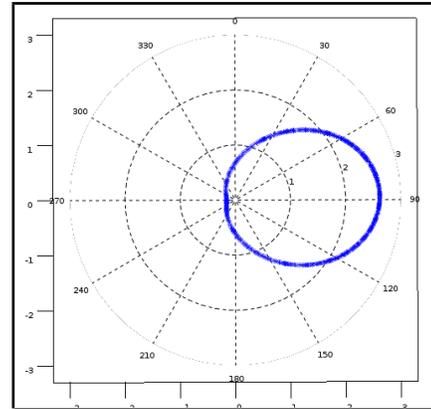
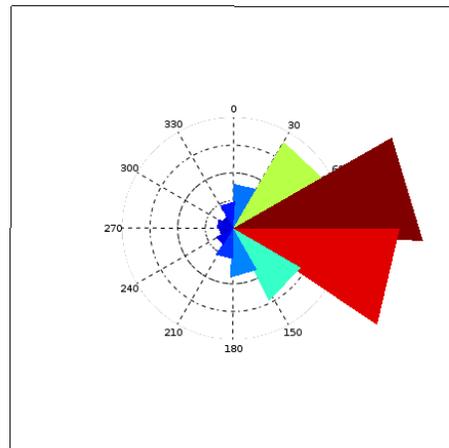


Figura 26. Probabilidad por sector circular

Tabla 9. Datos de la figura 26

Sector circular (grados)	Probabilidad
30	0.068966
60	0.138310
90	0.250474
120	0.213338
150	0.108753
180	0.063660
210	0.039030
240	0.026904
270	0.019704
300	0.021220
330	0.018189
360	0.031451



Octubre

Figura 27. Distribución de von Mises.

Parámetros de la distribución
 Ángulo medio (radianes) = 1.8045
 Ángulo medio (grados) = 103.39
 kappa = 0.48691
 Bessel cero = 0.15012

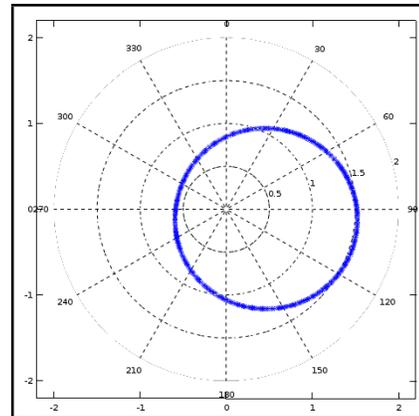
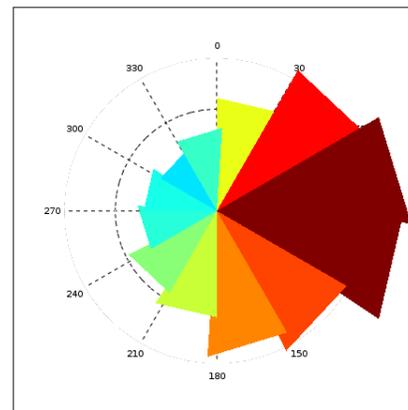


Figura 28. Probabilidad por sector circular
 Tabla 10. Datos de la figura 28

Sector circular (grados)	Probabilidad
30	0.074884
60	0.113221
90	0.130419
120	0.121820
150	0.115371
180	0.087782
210	0.079900
240	0.063776
270	0.060910
300	0.047295
330	0.050878
360	0.053744



□

Noviembre

Figura 29. Distribución de von Mises.

Parámetros de la distribución.
 Ángulo medio (radianes) = -2.0021
 Ángulo medio (grados) = -114.71
 kappa = 0.51671
 Bessel cero = 0.14904

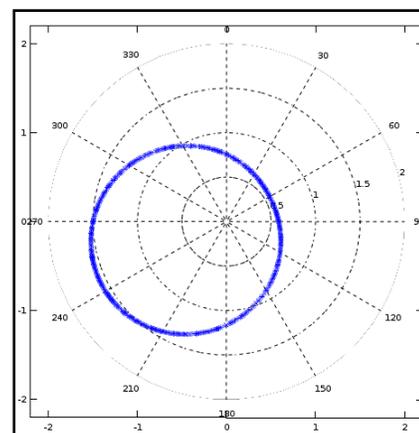
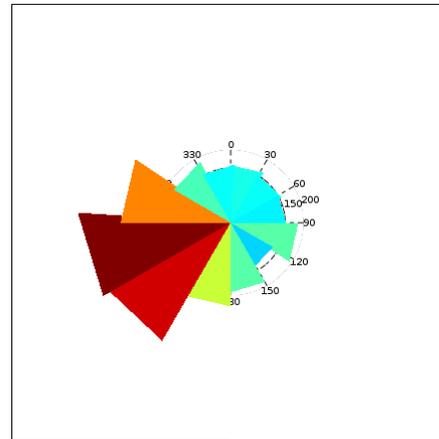


Figura 30. Probabilidad por sector circular
 Tabla 11. Datos de la figura 30.

Sector circular (grados)	Probabilidad
30	0.058846
60	0.058846
90	0.059236
120	0.062354
150	0.058457
180	0.065472
210	0.087295
240	0.153936
270	0.154326
300	0.116134
330	0.065472
360	0.059626



Diciembre

Figura 31. Distribución de von Mises.

Parámetros de la distribución

Ángulo medio (radianes) = -2.0771

Ángulo medio (grados) = -119.01

kappa = 1.2282

Bessel cero = 0.11254

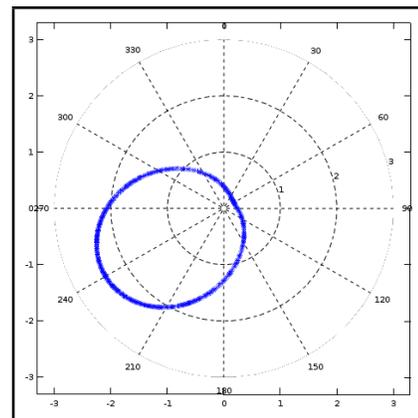
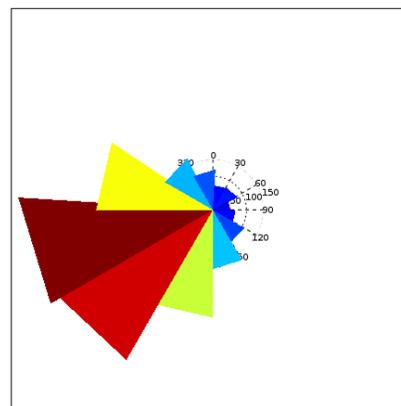


Figura 32. Probabilidad por sector circular

Tabla 12. Datos de la figura 32.

Sector circular (grados)	Probabilidad
30	0.030580
60	0.028197
90	0.019857
120	0.023828
150	0.049643

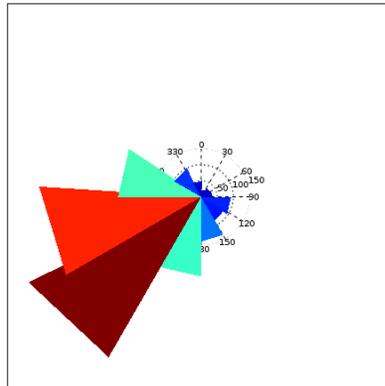
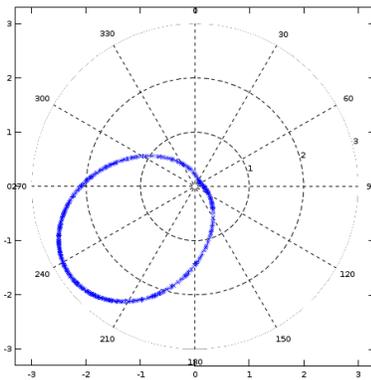


180	0.063145
210	0.123511
240	0.210485
270	0.226767
300	0.124702
330	0.057585
360	0.041700

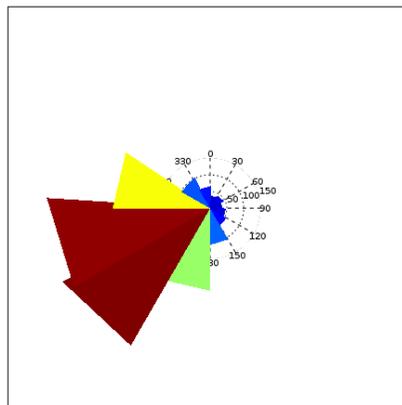
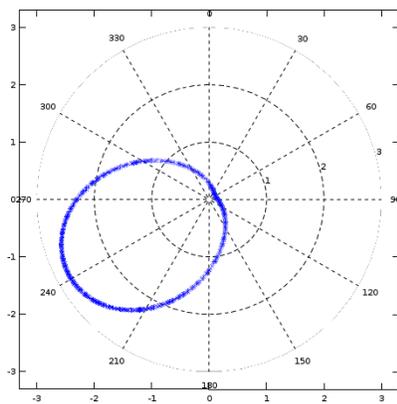
4.2 Estación Veracruz

Las siguientes gráficas corresponden a la estación 692 de Veracruz para el estrato de altitud de 5500 a 6500 m s. n. m. Los patrones de viento son casi iguales que para la estación anterior, por lo que se consideró innecesario replicar sus datos estadísticos y solo se muestran las gráficas.

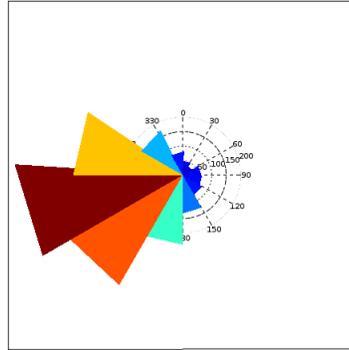
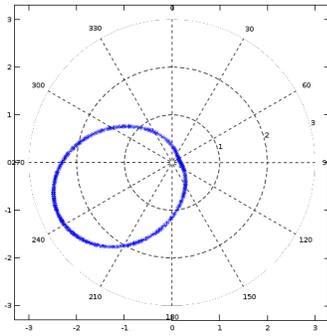
Enero. Figura 33 y 34.



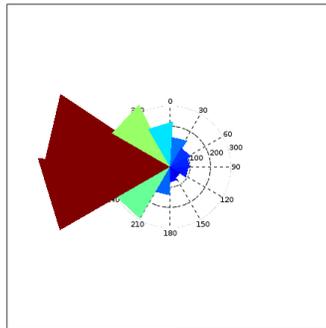
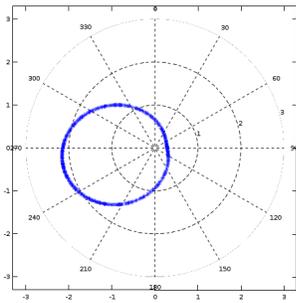
Febrero. Figura 35 y 36.



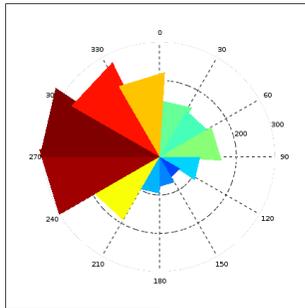
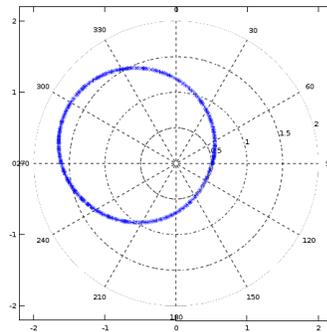
Marzo. Figura 37 y 38.



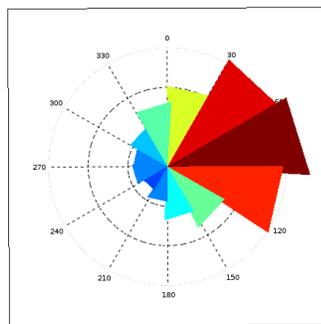
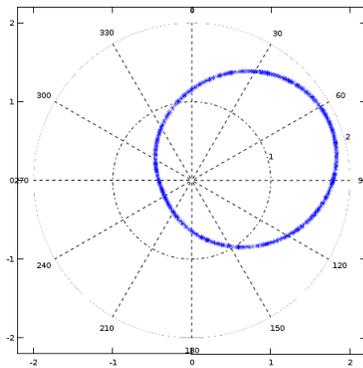
Abril. Figura 39 y 40.



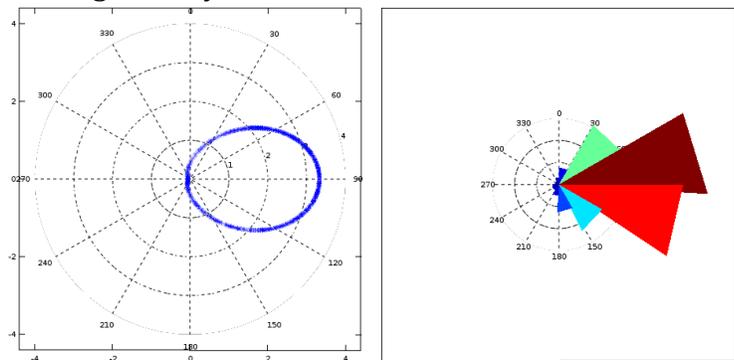
Mayo. Figura 41 y 42.



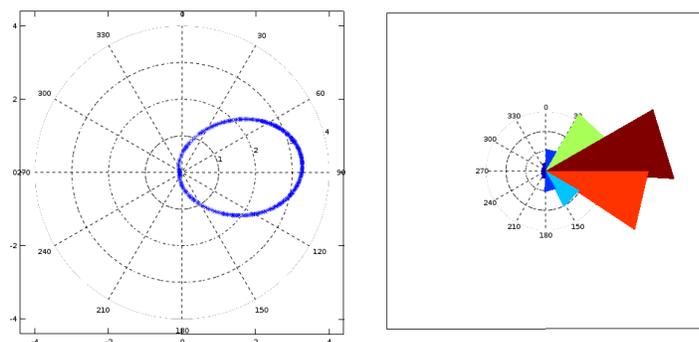
Junio. Figura 43 y 44.



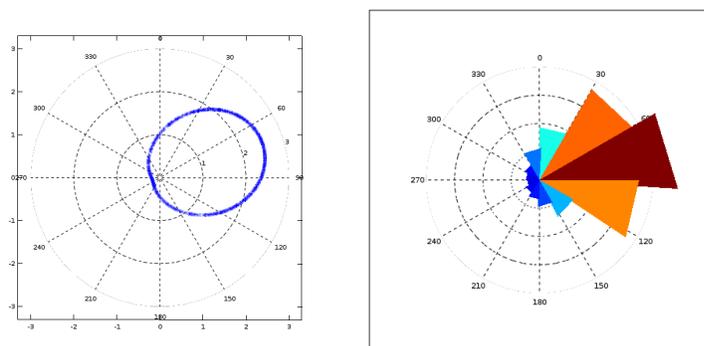
Julio. Figura 45 y 46.



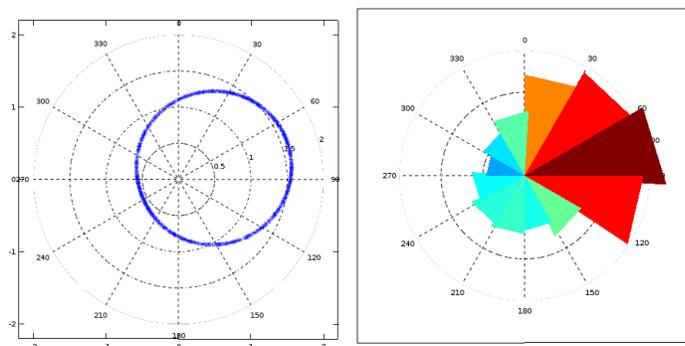
Agosto. Figura 47 y 48.



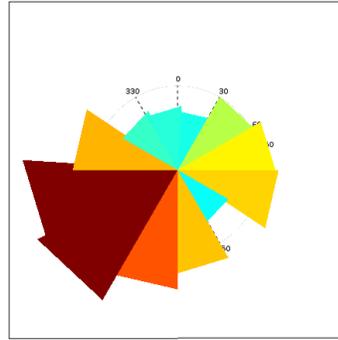
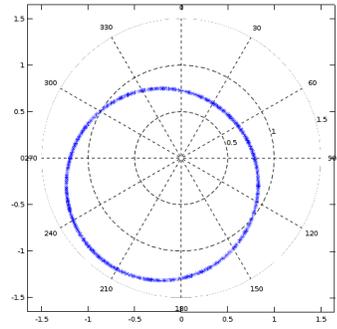
Septiembre. Figura 49 y 50.



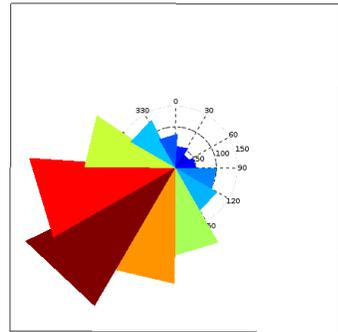
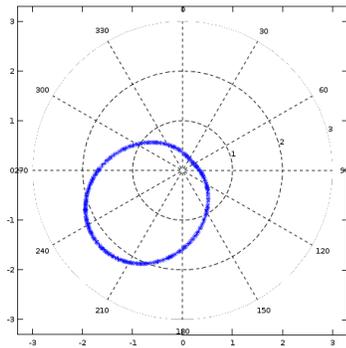
Octubre. Figura 51 y 52.



Noviembre Figura 53 y 54.



Diciembre. Figura 55 y 56.



B.5 Conclusiones

- Se cumplió con el objetivo principal que era hacer un programa para procesar la base de datos con la opción de estratificación al gusto del usuario. Al comparar los resultados de esta base de datos con trabajos previos sobre el mismo tema, se puede ver que el programa sí arroja los resultados esperados.
- Tanto la base de datos de la estación Tacubaya-Aeropuerto como la de Veracruz, muestran la misma tendencia en los mismo meses. Esto es coherente porque ambas estaciones están relativamente cerca.
- Se puede ver que los vientos se dividen en tres periodos principales. El primer periodo que va de diciembre a abril tiene un viento predominante del oeste. El segundo periodo que va de junio a octubre tiene un viento predominante del este. El tercer periodo serían los meses de mayo y noviembre que tienen vientos desde ambas direcciones.
- La estadística de los vientos por encima de los 5500 m s. n. m. arroja que los vientos son muy consistentes en la dirección, mientras que los vientos por debajo de esta cota son ligeramente más dispersos en su estadística, sobre todo en los meses de mayo y octubre que son los meses en los que cambian de dirección los vientos. Esto se debe a la turbulencia que causan las montañas hasta ese nivel.
- Se pudo observar que hay vientos cizallantes en los estratos bajos prácticamente todo el año, sobre todo por debajo de 5 mil m s. n. m.
- Cuando se toma la estadística de todos los estratos de altitud, desde 2000 m s. n. m. hasta 30000 m s. n. m., el mes de junio no se comportó como se esperaba. La distribución de los vientos sobre todos los estratos de altitud es muy uniforme. Se esperaba que tuviera una dirección preferencial proveniente de 90°, pero esto solo ocurre por arriba de 20 mil m s.n.m. y por debajo de 10 mil m s. n. m. Para los estratos de altitud entre 10 mil m s. n. m. y 20 mil m s. n. m., hay vientos que provienen de 90° y de 270°.
- No se pudo completar el primer objetivo secundario que era usar esta base de datos para investigar el retroceso glacial. La base de datos se puede usar, pero este análisis sería un trabajo completo por sí mismo.
- El segundo objetivo secundario también se cumplió pues se pudo obtener información para completar los archivos de entrada que necesita el programa Ashfall para modelado de caída de cenizas.
- En todo momento se supuso que los vientos no cambian o que su variación es despreciable para el mismo mes a diferentes años. Cabe hacerse la pregunta si es que por el calentamiento global, las variaciones (posiblemente solo en magnitud) son apreciables a lo largo de la serie de tiempo de setenta años. ¿Cómo se comportaría la serie de tiempo cíclica para estos datos? ¿Cómo sería la relación con la Oscilación Meridional El Niño?

Apéndice B.1

Manual de uso. Instrucciones para limpiar la base de datos y que pueda ser procesada para obtener información de vientos.

Estas instrucciones se deben ejecutar en Linux.

Al limpiar los archivos para encontrar la isoterma 0°C según las instrucciones que se encuentran en el apéndice A.1, se obtendrá un archivo por cada uno de los archivos originales. Dependiendo de cómo se haya obtenido la base de datos, es muy posible que cada archivo contenga los datos correspondientes a un año lectivo. Ahora, para poder procesar estos archivos y obtener la información correspondiente a los vientos es necesario hacer un archiuvo para cada mes. Para esto, primero hay que juntarlos todos en un solo archivo con la siguiente instrucción:

```
cat *.dat > todos679.dat
```

En donde el número 679 está asociado a una estación de radiosondeo particular. Esta instrucción debería variar para identificar a cada estación. Después, ya que se tiene un solo archivo que contiene todos los años, se usará otra instrucción para, a partir de este archivo, crear un archivo para cada mes, en total 12 archivos. La razón es que el programa de Octave que procesa estos datos trabaja con archivos mensuales.

En la misma carpeta en la que está el archivo *todos679.dat* se coloca el archivo *comandomeses.sh*. Las instrucciones completas de este archivo se encuentran en el apéndice B.2. Estas instrucciones sirven para lo siguiente:

```
grep '19[0-9]\{2\}01[0-9]\{3\}' todos679.dat > enero679-1.dat  
grep '19[0-9]\{2\}01[0-9]\{4\}' todos679.dat > enero679-1.dat
```

Las fechas tienen un formato asimétrico. Si por ejemplo una medición se realizó a las 6 de la mañana (6 horas) en la columna de las fechas tendremos aaaammddh, mientras que si la medición se realizó a las 3 de la tarde (15 horas) entonces tendremos aaaammddhh. Por lo que la primera instrucción es para los datos con el primer formato y la segunda instrucción para los datos con el segundo formato.

Cuando se utilice el programa para procesar otra estación hay que cambiar el número que indica la estación meteorológica con el función de *replace* de Gedit.

Las instrucciones anteriores solamente funcionan para los datos de años que comienzan con 1900. Para los años que comienzan con 2000 se usa a siguiente instrucción:

```
grep '20[0-9]\{2\}02[0-9]\{3\}' todos679.dat > enero679-2.dat  
grep '20[0-9]\{2\}02[0-9]\{4\}' todos679.dat > enero679-2.dat
```

Esto arroja dos archivos diferentes que tienen que concatenarse después con la instrucción:

```
cat enero679-1.dat enero679-2.dat > enero679.dat
```

Si hubiera algún otro archivo que fuera necesario concatenar por alguna actualización, se agrega

con la instrucción siguiente.

```
cat enero679-1.dat enero679-2.dat enero679-3.dat > enero679.dat
```

Una vez que se tienen los doce archivos, se procede a procesar estos datos con el programa que está escrito en Octave o Matlab. El archivo se llama VientosCilindro.m y solo sirve con archivos que estén arreglados por mes. También se puede usar el archivo llamado VientosOctaveCilindro.m que tiene adaptaciones propias para ejecutarse en linux, aunque sus funciones son menos poderosas y el programa puede tardar más.

Al ejecutarse, el archivo va a pedir ingresarle cierta información. Primero le pedirá al usuario que ingrese el valor en m s. n. m. de la altura desde la cual quiere empezar a calcular, puede ser la altura de la base de la estación o la del cráter del volcán o cualquier otra altura según sea necesario. En la segunda entrada hay que poner la altura máxima del análisis. En la tercera entrada hay que especificar cada cuántos metros se quiere estratificar los vientos, pues las direcciones de los vientos pueden cambiar en pocos metros, por lo que es deseable hacer un promedio sobre la dirección y velocidad para cada altura. En la mayor parte de los casos se usó una altura de 100 metros. Para hacer la estadística circular con los datos y poder graficarlos, se requiere que se divida el plano en sectores angulares de un determinado número de ángulos para poder cuantificar la preferencia en la dirección del viento.

El programa arroja un archivo que contiene la altura del intervalo, luego arroja el valor más probable de la dirección del viento para cada altura. También arroja dos gráficas. Ambas gráficas contienen los mismos datos pero representados de dos maneras distintas. La primera es un histograma bidimensional de los datos y la segunda es un histograma cilíndrico. La segunda es una mejor representación, sin embargo, solo es posible visualizarlo en forma de video o de archivo gif.

Apéndice B.2

Archivo comandomeses.sh

```
grep '19[0-9]\{2\}01[0-9]\{4\}' todos679.dat > enero679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}02[0-9]\{4\}' todos679.dat > febrero679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}03[0-9]\{4\}' todos679.dat > marzo679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}04[0-9]\{4\}' todos679.dat > abril679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}05[0-9]\{4\}' todos679.dat > mayo679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}06[0-9]\{4\}' todos679.dat > junio679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}07[0-9]\{4\}' todos679.dat > julio679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}08[0-9]\{4\}' todos679.dat > agosto679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}09[0-9]\{4\}' todos679.dat > septiembre679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}10[0-9]\{4\}' todos679.dat > octubre679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}11[0-9]\{4\}' todos679.dat > noviembre679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}12[0-9]\{4\}' todos679.dat > diciembre679-1.dat

grep '19[0-9]\{2\}01[0-9]\{3\}' todos679.dat > enero679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}02[0-9]\{3\}' todos679.dat > febrero679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}03[0-9]\{3\}' todos679.dat > marzo679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}04[0-9]\{3\}' todos679.dat > abril679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}05[0-9]\{3\}' todos679.dat > mayo679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}06[0-9]\{3\}' todos679.dat > junio679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}07[0-9]\{3\}' todos679.dat > julio679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}08[0-9]\{3\}' todos679.dat > agosto679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}09[0-9]\{3\}' todos679.dat > septiembre679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}10[0-9]\{3\}' todos679.dat > octubre679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}11[0-9]\{3\}' todos679.dat > noviembre679-1.dat
grep '19[0-9]\{2\}12[0-9]\{3\}' todos679.dat > diciembre679-1.dat

grep '20[0-9]\{2\}01[0-9]\{4\}' todos679.dat > enero679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}02[0-9]\{4\}' todos679.dat > febrero679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}03[0-9]\{4\}' todos679.dat > marzo679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}04[0-9]\{4\}' todos679.dat > abril679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}05[0-9]\{4\}' todos679.dat > mayo679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}06[0-9]\{4\}' todos679.dat > junio679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}07[0-9]\{4\}' todos679.dat > julio679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}08[0-9]\{4\}' todos679.dat > agosto679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}09[0-9]\{4\}' todos679.dat > septiembre679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}10[0-9]\{4\}' todos679.dat > octubre679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}11[0-9]\{4\}' todos679.dat > noviembre679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}12[0-9]\{4\}' todos679.dat > diciembre679-2.dat

grep '20[0-9]\{2\}01[0-9]\{3\}' todos679.dat > enero679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}02[0-9]\{3\}' todos679.dat > febrero679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}03[0-9]\{3\}' todos679.dat > marzo679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}04[0-9]\{3\}' todos679.dat > abril679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}05[0-9]\{3\}' todos679.dat > mayo679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}06[0-9]\{3\}' todos679.dat > junio679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}07[0-9]\{3\}' todos679.dat > julio679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}08[0-9]\{3\}' todos679.dat > agosto679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}09[0-9]\{3\}' todos679.dat > septiembre679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}10[0-9]\{3\}' todos679.dat > octubre679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}11[0-9]\{3\}' todos679.dat > noviembre679-2.dat
grep '20[0-9]\{2\}12[0-9]\{3\}' todos679.dat > diciembre679-2.dat

cat enero679-1.dat enero679-2.dat enero679-3.dat > enero679.dat
cat febrero679-1.dat febrero679-2.dat febrero679-3.dat > febrero679.dat
cat marzo679-1.dat marzo679-2.dat marzo679-3.dat > marzo679.dat
cat abril679-1.dat abril679-2.dat abril679-3.dat > abril679.dat
cat mayo679-1.dat mayo679-2.dat mayo679-3.dat > mayo679.dat
cat junio679-1.dat junio679-2.dat junio679-3.dat > junio679.dat
cat julio679-1.dat julio679-2.dat julio679-3.dat > julio679.dat
cat agosto679-1.dat agosto679-2.dat agosto679-3.dat > agosto679.dat
cat septiembre679-1.dat septiembre679-2.dat septiembre679-3.dat > septiembre679.dat
cat octubre679-1.dat octubre679-2.dat octubre679-3.dat > octubre679.dat
cat noviembre679-1.dat noviembre679-2.dat noviembre679-3.dat > noviembre679.dat
cat diciembre679-1.dat diciembre679-2.dat diciembre679-3.dat > diciembre679.dat
```

Apéndice B.3

Programa para ejecutarse en Octave

Este programa es una variante del programa original que está compilado para ejecutarse en la versión libre de Matlab que es Octave.

Se mantuvieron a propósito los caracteres que no lee Octave, pues no hay versión en español para poner acentos.

Esta es la versión que se usó para obtener las gráficas que se muestran en esta tesis.

```
%PROGRAMA PARA ANALIZAR LOS DATOS QUE SE OBTIENEN DEL SITIO DE READY.NOAA.GOV. EN
ESPECIAL PARA PROCESAR LOS DATOS OBTENIDOS DE LOS VIENTOS Y HACER UN ANÁLISIS
PROBABILISTICO DE LA DIRECCION Y LA VELOCIDAD PREDOMINANTE DE ESTE EN LAS
DIFERENTES ESTACIONES DEL Año. LOS DATOS QUE SE TIENEN AQUÍ SON DE LOS VIENTOS
POR ENCIMA DEL VOLCÁN PICO DE ORIZABA
%REALIZADO POR ERIC BENJAMÍN TALLEZ UGALDE
%ESTE CÓDIGO ES UNA ADAPTACIÓN POSTERIOR PARA EJECUTARSE SOLO EN OCTAVE
%JUNIO DE 2018

%% *****% 1. NOMBRE DEL PROGRAMA Y ENTRADA DE DATOS *****
function VientosOctaveCilindro(NombreArchivo)

Archivo= load(NombreArchivo); % carga el archivo
Fechas=Archivo(:,1);
DV=Archivo(:,7); %Toma la columna de direcciones y las asigna a DireccionesViento
VV=Archivo(:,8);

%% *****% 2. ANALISIS DE DATOS*****

%con esta linea voy a poner todas las fechas como un número para poder tratarlas
mejor
totalarchivo=length(Fechas);
% ciclo para homologar el formato de las fechas y para cambiar el dato del ángulo
de la dirección del viento a su seno y su coseno para un tratamiento más eficaz de
los datos
for p=1:totalarchivo
    if (Fechas(p) < 1000000000) %Este condicional lo puse para poder hacer el
promedio de todas las fechas de manera mas fácil, ya que el archivo que
generó el otro programa arroja las fechas y las horas de la medición pegadas en un
sólo numero de la forma aaaammddhh, pero si una medición se había realizado a las 6
de la mañana el numero que resultaba era aaaammdd6 y si la medición se había
realizado a las 3 de la tarde entonces arroja aaaammdd15, dando un número 10 veces
mas grande. Entonces la siguiente operación cambia por ejemplo aaaammdd6 por
aaaammdd06
        Fechas(p)=10*Fechas(p)-9*rem(Fechas(p),10);
    end
end

%FechasOrdenadas=sort(Fechas); %para ordenar las fechas de menor a mayor
sindato=99999; %asegura que todos los valores en la matriz sean valores buenos

Fechasunicas = unique(Fechas); % busca dentro de fechas, las fechas que son
diferentes o únicas y lo asigna a FechasUnicas, es decir, FechasUnicas es un vector
en el que cada entrada contiene cada fecha diferente del archivo
```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
indmalos=find(Archivo(:,4) == sindato); %Busca en las alturas las que son iguales
al máximo y asigna los índices a indmalos
Archivo(indmalos,4)=Archivo(indmalos,4)-sindato-1; %Asigna a los renglones con
99999 un valor negativo
valido=max(Archivo(:,4)); %asigna el nuevo valor válido para la altura

%Condiciones sobre MAXAltura
vac3=isempty(MAXAltura);
if (vac3==1)
    MAXAltura=valido;
end

totaldealturas=floor((MAXAltura-MSNM)/Tamanodelintervalo)+1; %Resta valido menos
MSNM y luego lo divide maxaltura entre tamanodelintervalo y se queda con la parte
entera

Multimatriz=[]; %se crea una matriz multidimensional de totfechas*alturas*dos, en
la primera entrada van las fechas y luego las laturas y finalmente para dividir en
direccion y velocidad

DV=DV*pi/180;
DVSeno=sin(DV);
DVCoseno=cos(DV);

% Empieza un ciclo para analizar todas las fechas diferentes
for i=1:totfechas

    unafecha=Fechasunicas(i); % asigna a la variable unafecha el valor de la
entrada i de FechasUnicas
    MisIndices=find(Fechas==unafecha); % Busca dentro de Anos las que son iguales a
unano y los índices que pertenecen a esos anos iguales se lo asigna a indicesanos,
entonces, indicesanos es un vector que tiene los índices de anos iguales para este
ano en particular
    cuantasestafecha=length(MisIndices);

    for b=1:totaldealturas
        AlturaBaja=floor(MSNM/Tamanodelintervalo)*Tamanodelintervalo+(b-
1)*Tamanodelintervalo; %estas variables definen el intervalo de partici
n de las
alturas

        AlturaAlta=floor(MSNM/Tamanodelintervalo)*Tamanodelintervalo+b*Tamanodelintervalo;

        EsteIntervaloVel=[]; % se crean estos vectores vacios para un promedio de
datos pequeño
        EsteIntervaloDirSeno=[];
        EsteIntervaloDirCoseno=[];

        for s=1:cuantasestafecha

            % condiciones sobre los datos. La columna 7 tiene la dirección en
grados y la 8 la velocidad en metros sobre segundo

```

```

        if (Archivo(MisIndices(s),7) == sindato) || (Archivo(MisIndices(s),8)
== sindato) % si en la columna de la velocidad del viento está el valor 99999,
quiere decir que en realidad no hay datos, entonces se lo salta
        continue;
        elseif (Archivo(MisIndices(s),4) <= MSNM) %reduce el rango de busqueda
de los datos desde el numero que aparece en MSNM
        continue;
        elseif (Archivo(MisIndices(s),4) >= MAXAltura) %reduce el rango de
busqueda de los datos hasta el numero que aparece en MAXAltura
        continue;
        elseif (Archivo(MisIndices(s),4) > AlturaBaja) &&
(Archivo(MisIndices(s),4) <= AlturaAlta); %condicional para estratificar las altura
        EsteIntervaloVel=[EsteIntervaloVel; Archivo(MisIndices(s),8)];
        EsteIntervaloDirSeno=[EsteIntervaloDirSeno; DVSeno(MisIndices(s))];
        EsteIntervaloDirCoseno=[EsteIntervaloDirCoseno;
DVCoseno(MisIndices(s))];
        end % fin del condicional linea 91
    end

    empty=isempty(EsteIntervaloDirSeno); %Verifica que el vector no est❖ vac❖o

    if (empty==1) %si el vector esta vacio se sigue a la siguiente altura
        continue;
    else %si no esta vacio hace los calculos para promediar las
alturas y dejar una sola altura por cada intervalo de alturas

        %Hay que recordar que las direcciones del seno y el coseno est❖n
cambiadas porque la direcci❖n 0❖ significa que el viento proviene del norte
        MediaInterY=mean(EsteIntervaloVel.*EsteIntervaloDirSeno); %Multiplica
la velocidad y la magnitud entrada a entrada para poder facilitar los cálculos.
Saca la media de estos resultados.
        MediaInterX=mean(EsteIntervaloVel.*EsteIntervaloDirCoseno); %lo mismo
para la otra direcci❖n

        MagEstaAltura=sqrt(MediaInterX^2+MediaInterY^2); % Se suman las
magnitudes vectorialmente para obtener el vector de velocidad final

        %La siguiente operaci❖n evita la divisi❖n entre cero en la funcion
del arcotengente
        if (MediaInterX == 0) && (MediaInterY > 0)
            DirEstaAlt = pi/2;
        elseif (MediaInterX == 0) && (MediaInterY < 0)
            DirEstaAlt = -pi/2;
        elseif (MediaInterX == 0) && (MediaInterY == 0)
            DirEstaAlt = 0;
        else
            DirEstaAlt=atan2(MediaInterY,MediaInterX); %Saca el ángulo en
radianes
        end

        DirEstaAltGrad=DirEstaAlt*180/pi; %se convierte el vector a grados

        %Este condicional es para reajustar la gráfica del arcotangente,
%pues esta funci❖n s❖lo est❖ definida de -pi/2 hasta pi/2
        if (DirEstaAltGrad < 0) %si los valores son de esta forma saldra un
valor negativo que en realidad estara entre 270 y 360 grados

```

```

        DirEstaAltGrad=DirEstaAltGrad+360;
    end

    end %fin del ciclo linea 112

    Multimatriz=[Multimatriz; [unafecha AlturaAlta MagEstaAltura
DirEstaAltGrad]]; %se construye una matriz con estos valores

    end %fin del condicional linea 92

end %fin del ciclo linea 90

%Aquí tendría que ser capaz de ponerle para cualquier altura y poder
%visualizarla o incluso todaz las alturas
todasdirecciones=[]; % se crean estos vectores vacíos
todasvelocidades=[];

%Se hace un nuevo ciclo para poder graficar todas las alturas en un
%histograma
for b=1:totaldealturas

AlturaAlta=floor(MSNM/Tamanodelintervalo)*Tamanodelintervalo+b*Tamanodelintervalo;
%Se hace esta igualdad para encasillar a todas las alturas de este intervalo
    indices=find(Multimatriz(:,2) == AlturaAlta); %se buscan las alturas en la
matriz
    otravac=isempty(indices); %verifica que no este vacia
    if (otravac==1) % si esta vacia se va con la siguiente altura
        continue;
    else % si no se hacen estos cálculos
        cuantos=length(indices);
        for xy=1:cuantos
            todasalturas(xy,b)=Multimatriz(indices(xy),2); % Asigna a todasalturas
todas los renglones que tienen un índice igual a AlturaAlta de la columna 2 de
Multimatriz
            todasdirecciones(xy,b)=Multimatriz(indices(xy),4); % Asigna a
todasdirecciones todos los renglones que tienen un índice igual a AlturaAlta de la
columna 2 de Multimatriz
            todasvelocidades(xy,b)=Multimatriz(indices(xy),3); % Asigna a
todasvelocidades todos los renglones que tienen un índice igual a AlturaAlta de la
columna 2 de Multimatriz

            end %Fin del ciclo for
        end %Fin del condicional

end %fin del ciclo for

%file_cil = fopen('cilindro.dat', 'a'); %Esta instrucc n es para abrir un archivo
para escribir los datos del cilindro

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Este pedazo de codigo es para eliminar los ceros que tiene la matriz
todasdirecciones
%y que estan puestos para hacer que todas las columnas tengan la misma longiutd de
datos

```

```

%Si no se quitan estos ceros, el histograma los grafica como si fueran ceros
validos
L=length(todasdirecciones(:,1));
for xy=1:L
    for b=1:totaldealturas
        if (todasdirecciones(xy,b) == 0)
            todasdirecciones(xy,b) = NaN;
            %todasvelocidades(xy,b)= NaN;
            %todasalturas(xy,b) = NaN;
        else
            continue;
        end
    end

% Esta parte es para hacer un archivo con los datos.
    %fprintf(file_cil,'%f',todasvelocidades(xy,b));    %%inserta las
velocidades que es la magnitud del vector
    %fprintf(file_cil,'\t');                %inserta un espacio de tabulador
    %fprintf(file_cil,'%f',todasdirecciones(xy,b));    %Inserta el la
direccion a esta altura que es el ángulo
    %fprintf(file_cil,'\t');                % inserta un espacio de tabulador
    %fprintf(file_cil,'%f',todasalturas(xy,b));    %Inserta la altura que es
la coordenada zeta
    %fprintf(file_cil,'\n');                % inserta un salto de linea

    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%fclose(file_cil); %cierra el archivo .dat para el histograma

%Para graficar el histograma
figure                                % pone una nueva figura
hist(todasdirecciones,pieewisenumber) %grafica todas las alturas juntas. Por su
puesto que hay alturas que no hay y esas no las grafica
title(NombreArchivo,'FontWeight','bold')
xlabel('ángulo en grados');
ylabel('Frecuencia de los eventos');
hold;

%Fin del promedio para todo el mes para cada altura diferente

%% Este pedazo de código es para poder visualizar un histograma cilíndrico
% de los datos, pues me parece que es la manera más natural de verlos
% Este pedazo de código se escribió después del programa original pero fue
% realizado igualmente por Eric Tellez

% Primero hay que agrupar los datos de los ángulos con el valor definido por
% el usuario la variable se llama pieewisenumber
%colordef(figure,'black'); %Pone el color de fondo en negro
theta_vec=linspace(0,360,pieewisenumber);%genera un vector con valores igualmente
espaciados de tamaño pieewisenumber
zeta_vec = linspace(0,totaldealturas,totaldealturas); %genera totaldealturas
valores entre 1 y totaldealturas incluidos los limites esto es solo para poder
generar la referencia polar
[theta,zeta] = meshgrid(theta_vec,zeta_vec); %hace una matriz que relaciona los dos
valores generados antes mostrados antes
histtheta=[];

```

```

th_vec=linspace(0,360,piecewisenumber+1);

%Este ciclo es para crear el vector histtheta que contiene los valores que
%una medici3n se repite en el intervalo deseado
for b=1:numel(zeta_vec)
    if todasdirecciones(1:b)==0
        continue;
    else
        for xy=1:numel(theta_vec)
            otroindice=find((todasdirecciones(:,b) >= th_vec(xy)) &
(todasdirecciones(:,b) <= (th_vec(xy+1))));
            histtheta(xy,b)=numel(otroindice);
        end
    end
end

Histmax=max(histtheta(:)); %calcula el valor m3ximo del vector histtheta
z_vec=linspace(0,Tamanodelintervalo*totaldealturas,totaldealturas+1); %Genera un
vector de valores que incluye el cero, este vector si me sirve ATENCION: ESTE
VECTOR ES MAS IMPORTANTE QUE EL VECTOR zeta_vec, NO SE HA DUPLICADO POR ERROR,
CUMPLEN FUNCIONES DIFERENTES. La diferencia con la instrucci3n de arriba es que no
tiene a3adido el 'factor' . Este factor hace que la gr3fica se vea mas regular.

figure
polar(nan,max(max(histtheta'.*cosd(theta)))); %Esta funci3n crea una grafica en
coordenadas polares con angulo nan y con radio la otra funcion
hold; %Mantiene todos los valores predeterminados para la gr3fica

for b=1:numel(z_vec)-1

    for xy=1:numel(th_vec)-1

        w=tand(piecewisewidth)*histtheta(xy,b); %Esta instrucci3n es para que
el histograma se parezca a lo que aparece con la funci3n rose. tand calcula la
tangente del 3ngulo en grados
        c=cosd(piecewisewidth); %Esta instrucci3n tiene la misma funci3n, cosd
calcula el coseno del 3ngulo en grados
        %t=Tamanodelintervalo/factor; % Esta instruccion es por si se necesita
cambiar el tama3o en zeta
        t=Tamanodelintervalo;

        X=([0 0 1 0 0;
            c c c c 1;
            c 1 c 1 1;
            0 0 1 0 0])*histtheta(xy,b); %Se define la matriz de valores del
histograma para la variable X, son 5 columnas porque son 5 caras para hacer un
histograma en coordenadas polares y son 4 renglones porque cada cara tiene 4
aristas

        Y=([0 0 0 0 0;
            w w w w 0;
            w 0 w 0 0;
            0 0 0 0 0]); %Se define la matriz de valores del
histograma para la Y

        Z=([0 t t 0 0;
            0 t t 0 0;
            t t 0 0 t;

```

```

        t t 0 0 t])+z_vec(b); %Se define la matriz para Z y se le suma el
valor de zeta_vec para trasladar cada rectangulo

        h= patch(X,Y,Z,0*X+histtheta(xy,b),'edgecolor','none'); %Se crean los
objetos del histograma. La instruccion patch dibuja un poligono con los vertices
indicados por las coordenadas X,Y,Z pero como cada una de estas variables es una
matriz entonces se dibuja un poligono por cada columna de la matriz de puntos,
entonces tenemos 5 cuadrados en total
        rotate(h,[0 0 1],th_vec(xy),[0 0 0]); %Se rota todo alrededor del eje
z una cantidad igual a la que tiene el vector theta_vec

    end % Fin del condicional
end % Fin del condicional

%Esto es para ajustar la grafica del histograma cilindrico
[Xc,Yc,Zc] = cylinder([1 1]); %Crea un cilindro de radio 1, con un numero de
divisiones laterales iguales a piecewisenumbr
hc = surf(Histmax*Xc,Histmax*Yc,Tamanodelintervalo*totaldealturas*Zc); %Le da el
tamaño al cilindro en cada uno de los ejes.
set(hc,'facecolor','none','edgecolor','w','edgealpha',0.2) %Ajusta los datos de la
grafica
set(gca,{'xtick' 'ytick' 'ztick' 'vis' 'clim'},{[] [] [] 'on' [0 Histmax]})
set(gca,'xdor','reverse') %Esta instruccion es para que los angulos de la grafica
aparezcan en sentido horario y de esa forma se cumple la convención meteorologica
axis auto; %ajusta los ejes de manera que se vean cuadrados
title(NombreArchivo,'FontWeight','bold') % Le pone título a la grafica
xlabel('Los colores representan el número de veces que se registró la medición')
%text(-2.7*Histmax,-0.2*Histmax,0,'Direccion del viento, 0°=N, 90°=O, 180°=S,
270°=E.')
ylabel('Altura en MSNM')
box on; % se activa la grafica
view(3) %pone la figura en 3 dimensiones
%colorbar %Pone la barra de colores de un lado

%Aqui se acaba el código para graficar el histograma cilindrico

end % fin del programa

```

Apéndice B.4

Programa para graficar un histograma cilíndrico. Este programa tiene la siguiente licencia y se puede encontrar en el sitio oficial de Mathworks.

3D cylindrical histogram, MATLAB, Copyright 2012, Eric B.Téllez, BSD License.

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35555-3d-cylindricalhistogram>

```
%% Programa para hacer un histograma tridimensional en coordenadas cilíndricas

%Escrito solo para visualizar la base de datos de los vientos procesados
%del servicio meteorológico nacional
%Comenzado el 15 de febrero de 2012
%Escrito por Eric Benjamín Téllez Ugalde, cualquier duda escribir a
%erictellez@gmail.com
%Casi todo el programa se adaptó de uno existente en un foro de Mathworks
%para realizar un histograma esférico

%% Este pedazo de código es para ajustar la figura y los datos.
colordef(figure,'black'); % Pone el color de fondo en negro.
theta_vec = linspace(0,2*pi,36); % Genera 36 valores espaciados entre 0 y 2pi,
incluidos los límites.
zeta_vec = linspace(0,30,31); % Genera 31 valores entre 0 y 30 incluidos los
límites.
[theta,zeta] = meshgrid(theta_vec,zeta_vec); % Hace una matriz que relaciona los
dos valores generados mostrados antes.
% H son los datos.
H = 10*(rand(size(theta))); % Crea una serie de datos a partir de una distribución
aleatoria.
Hmax = max(H(:)); % Obtiene el máximo del vector.
r=0.03*Hmax;
polar(nan,max(max(H.*cos(theta)))); % Esta función crea una grafica en coordenadas
polares con ángulo NaN y con radio la otra función
hold all; % Mantiene todos los valores predeterminados para la gráfica

%% Estas instrucciones son para hacer el histograma.
for kk = 1:numel(theta_vec); % Desde 1 hasta el total del vector theta_vec.
    for jj = 1:numel(zeta_vec); % Desde 1 hasta el total del vector phi_vec.

        %c=1/sqrt((H(jj,kk))^2+1); % Una constante para poder hacer que el
histograma en coordenadas polares tenga la misma longitud por lado.
        c=1; % Para usarse en caso de que sea necesario.

        X=([0 0 1 0 0;
            c c c c 1;
            c 1 c 1 1;
            0 0 1 0 0])*H(jj,kk); % Se define la matriz de valores del histograma
para la variable X, son 5 columnas porque son 5 caras para hacer un histograma en
coordenadas polares y son 4 renglones porque cada cara tiene 4 aristas.
        Y=([0 0 0 0 0;
```

```

        c c c c 0;
        c 0 c 0 0;
        0 0 0 0 0]); % Se define la matriz de valores del histograma para la
Y.
        Z=([0 1 1 0 0;
           0 1 1 0 0;
           1 1 0 0 1;
           1 1 0 0 1])+zeta_vec(jj); % Se define la matriz para Z y se le suma el
vector zeta_vec para trasladar cada rectángulo.

        h= patch(X,Y,Z,0*X+H(jj,kk),'edgecolor','none'); % Se crean los objetos
del histograma. La instrucción patch dibuja un polígono con los vértices indicados
por las coordenadas X,Y,Z pero como cada una de estas variables es una matriz
entonces se dibuja un polígono por cada columna de la matriz de puntos, entonces
tenemos 5 cuadrados en total.
        rotate(h,[0 0 1],180/pi*theta_vec(kk),[0 0 0]); % Se rota todo alrededor
del eje z.

        end;
end;

%% Esto es para ajustar la gráfica
[Xs,Ys,Zs] = cylinder(Hmax*0.01); % Grafica un cilindro a partir de los datos.
hs = surf(Hmax*Xs,Hmax*Ys,Hmax*Zs);
set(hs,'facecolor','none','edgecolor','w','edgealpha',0.2) % Ajusta los datos de la
gráfica.
set(gca,{'xtick' 'ytick' 'ztick' 'vis' 'clim'},{[] [] [] 'on' [0 Hmax]});
set(gcf,'Renderer','opengl'); % Hace compatible la gráfica con opengl
axis auto; % Ajusta los ejes.
box on; %
view(3) % Pone la figura en 3 dimensiones.
colorbar % Pone la barra de colores de un lado.
drawnow;

% Fin del programa

```



```

EsteIntervaloDirSeno=[];
EsteIntervaloDirCoseno=[];

for s=1:cuantasesatafecha

    % condiciones sobre los datos. La columna 7 tiene la dirección en
    grados y la 8 la velocidad en metros sobre segundo
    if (Archivo(MisIndices(s),7) == sindato) || (Archivo(MisIndices(s),8)
    == sindato) % si en la columna de la velocidad del viento está el valor 99999,
    quiere decir que en realidad no hay datos, entonces se lo salta
        continue;
    elseif (Archivo(MisIndices(s),4) <= MSNM) %reduce el rango de búsqueda
    de los datos desde el numero que aparece (en MSNM)
        continue;
    elseif (Archivo(MisIndices(s),4) >= MAXAltura) %reduce el rango de
    búsqueda de los datos hasta el numero que aparece en MAXAltura
        continue;
    elseif (Archivo(MisIndices(s),4) > AlturaBaja) &&
    (Archivo(MisIndices(s),4) <= AlturaAlta); %condicional para estratificar las altura
        EsteIntervaloVel=[EsteIntervaloVel; Archivo(MisIndices(s),8)];
        EsteIntervaloDirSeno=[EsteIntervaloDirSeno;
    DVcompY(MisIndices(s))];
        EsteIntervaloDirCoseno=[EsteIntervaloDirCoseno;
    DVcompX(MisIndices(s))];
    end % fin del condicional linea 91
end

empty=isempty(EsteIntervaloDirSeno); %Verifica que el vector no est❖ vac❖o

if (empty==1) %si el vector esta vacio se sigue a la siguiente altura
    continue;
else %si no esta vacio hace los calculos para promediar las
    alturas y dejar una sola altura por cada intervalo de alturas

        MediaInterY=mean(EsteIntervaloVel.*EsteIntervaloDirSeno); %Multiplica
    la velocidad y la magnitud entrada a entrada para poder facilitar los cálculos.
    Saca la media de estos resultados.
        MediaInterX=mean(EsteIntervaloVel.*EsteIntervaloDirCoseno); %lo mismo
    para la otra dirección

        MagEstaAltura=sqrt(MediaInterX^2+MediaInterY^2); % Se suman las
    magnitudes vectorialmente para obtener el vector de velocidad final

        %La siguiente operaci❖n evita la divisi❖n entre cero en la funcion
    del arcotengente
        if (MediaInterX == 0) && (MediaInterY > 0)
            DirEstaAlt = pi/2;
        elseif (MediaInterX == 0) && (MediaInterY < 0)
            DirEstaAlt = -pi/2;
        elseif (MediaInterX == 0) && (MediaInterY == 0)
            DirEstaAlt = 0;
        else
            DirEstaAlt=atan2(MediaInterY,MediaInterX); %ángulo en radianes
        end
end

```

```

DirEstaAltGrad=DirEstaAlt*180/pi; %se convierte el vector a grados

end %fin del ciclo linea 112

Multimatriz=[Multimatriz; [unafecha AlturaAlta MagEstaAltura
DirEstaAltGrad]]; %se construye una matriz con estos valores

end %fin del condicional linea 92

end %fin del ciclo linea 90

%Aquí tendrá que ser capaz de ponerle para cualquier altura y poder
%visualizarla o incluso todas las alturas
todasdirecciones=[]; % se crean estos vectores vacíos
todasvelocidades=[];

%file_cil = fopen('cilindro.dat', 'a'); %Esta instrucción es para abrir un archivo
para escribir los datos del cilindro

%Se hace un nuevo ciclo para poder graficar todas las alturas en un
%histograma
for b=1:totaldealturas
    AlturaAlta=MSNM+b*Tamanodelintervalo; %Se hace esta igualdad para encasillar a
todas las alturas de este intervalo
    indices=find(Multimatriz(:,2) == AlturaAlta); %se buscan las alturas en la
matriz
    otravac=isempty(indices); %verifica que no este vacia
    if (otravac==1) % si esta vacia se va con la siguiente altura
        continue;
    else % si no se hacen estos cálculos
        cuantos=length(indices);
        for xy=1:cuantos
            todasalturas(xy,b)=Multimatriz(indices(xy),2); % Asigna a todasalturas
todos los renglones que tienen un índice igual a AlturaAlta de la columna 2 de
Multimatriz
            todasdirecciones(xy,b)=Multimatriz(indices(xy),4); % Asigna a
todasdirecciones todos los renglones que tienen un índice igual a AlturaAlta de la
columna 2 de Multimatriz
            todasvelocidades(xy,b)=Multimatriz(indices(xy),3); % Asigna a
todasvelocidades todos los renglones que tienen un índice igual a AlturaAlta de la
columna 2 de Multimatriz

            % Esta parte es para hacer un archivo con los datos para el
            % histograma cilíndrico.
            %fprintf(file_cil,'%f',todasvelocidades(xy,b)); %inserta las
velocidades que es la magnitud del vector
            %fprintf(file_cil,'\t'); %inserta un espacio de tabulador
            %fprintf(file_cil,'%f',todasdirecciones(xy,b)); %Inserta el la
direccion a esta altura que es el ángulo
            %fprintf(file_cil,'\t'); % inserta un espacio de tabulador
            %fprintf(file_cil,'%f',todasalturas(xy,b)); %Inserta la altura que es
la coordenada zeta
            %fprintf(file_cil,'\n'); % inserta un salto de linea

        end %Fin del ciclo for
    end %Fin del condicional
end %Fin del ciclo

```



```

Erre=sqrt(S.^2+C.^2);
R=Erre/sumahist;

%Este condicional es para no perder la informaci3n que arroja
%el arcotangente, pues esta funci3n s3lo est3 definida de -pi/2
%hasta pi/2
%if (C > 0) && (S < 0) %si los valores son de esta forma saldra un valor negativo
que en realidad estara entre 270 y 360 grados
%   angulomedio=atan(S/C)+2*pi();
%elseif (C < 0) % si sale este valor entonces esta entre 90 y 270
%   angulomedio=atan(S/C)+pi();
%else
   angulomedio=atan2(S,C);
%end

%Para calcular kappa que es un parametro de la distribucion de von Mises
%Estos parametros se encuentran en el libro de Fischer
if R < 0.53
   kappa = 2*R + R^3 + 5*R^5/6;
elseif R>=0.53 && R<0.85
   kappa = -.4 + 1.39*R + 0.43/(1-R);
else
   kappa = 1/(R^3 - 4*R^2 + 3*R);
end

angulomedio
angulomedio*180/pi()
kappa
Besselcero = 1/(2*pi*besseli(0,kappa)) %Funcion modificada de Bessel de primer
tipo de orden cero
pdf=[];

for t=1:L
if (N(t)==0)
unapdf=2*pi()*Besselcero*exp(kappa*cos(todasdirecciones(t)-angulomedio));
%Funcion densidad de probabilidad
pdf=[pdf; unapdf];
end
end

figure
polar(todasdirecc,pdf,'b*')
set(gca,'xdir','reverse')
title(NombreArchivo)
xlabel('Angulo en grados');
hold;

figure
plot(todasdirecc,pdf,'b*')
title(NombreArchivo,'FontWeight','bold')
xlabel('Angulo en radianes');
ylabel('Densidad de probabilidad');
hold;

end % fin del programa

```

Apéndice B.6

Programa para Ashfall 1, Citlaltépetl

Programa para ejecutarse en Matlab u Octave

```
%PROGRAMA PARA ANALIZAR LOS DATOS QUE SE OBTIENEN DEL SITIO DE READY.NOAA.GOV. EN
ESPECIAL PARA PROCESAR LOS DATOS OBTENIDOS DE LOS VIENTOS Y HACER UN ANÁLISIS
PROBABILÍSTICO DE LA DIRECCIÓN Y LA VELOCIDAD PREDOMINANTE DE ESTE EN LAS
DIFERENTES ESTACIONES DEL AÑO. LOS DATOS QUE SE TIENEN AQUÍ SON DE LOS VIENTOS POR
ENCIMA DEL VOLCÁN PICO DE ORIZABA
%REALIZADO POR ERIC BENJAMÍN TÉLLEZ UGALDE

%% *****% 1. NOMBRE DEL PROGRAMA Y ENTRADA DE DATOS *****
function VientosPauCilindro(NombreArchivo)

Archivo= load(NombreArchivo); % Carga el archivo.
Fechas=Archivo(:,1);
DV=Archivo(:,7); % Toma la columna de direcciones y las asigna a
DireccionesViento.
VV=Archivo(:,8);

%% *****% 2. ANALISIS DE DATOS*****

% Con esta línea voy a poner todas las fechas como un número para poder tratarlas
mejor.
totalarchivo=length(Fechas);
% Ciclo para homologar el formato de las fechas y para cambiar el dato del ángulo
de la dirección del viento a su seno y su coseno para un tratamiento más eficaz de
los datos.
for p=1:totalarchivo
    if (Fechas(p) < 1000000000) % Este condicional lo puse para poder hacer el
promedio de todas las fechas de manera más fácil, ya que el archivo que generó el
otro programa arroja las fechas y las horas de la medición pegadas en un solo
número de la forma aaaammddhh, pero si una medición se había realizado a las 6 de
la mañana el numero que resultaba era aaaammdd6 y si la medición se había realizado
a las 3 de la tarde entonces arroja aaaammdd15, dando un número 10 veces más
grande. Entonces la siguiente operación cambia por ejemplo aaaammdd6 por
aaaammdd06.
        Fechas(p)=10*Fechas(p)-9*rem(Fechas(p),10);
    end
end

%FechasOrdenadas=sort(Fechas); % Para ordenar las fechas de menor a mayor.
sindato=99999; % Asegura que todos los valores en la matriz sean valores buenos.

Fechasunicas = unique(Fechas); % Busca dentro de fechas, las fechas que son
diferentes o únicas y lo asigna a FechasUnicas, es decir, FechasUnicas es un vector
en el que cada entrada contiene cada fecha diferente del archivo.
totfechas = length(Fechasunicas); % Busca la longitud del vector anosunicos y el
total se lo asigna a totanos.

% Introducción de variables vectoriales vacías. Tendrían que ser variables
% globales de preferencia para que las evalúe cada celda.
```



```

        if (Archivo(MisIndices(s),7) == sindato) || (Archivo(MisIndices(s),8)
== sindato) % Si en la columna de la velocidad del viento está el valor 99999,
quiere decir que en realidad no hay datos, entonces se lo salta.
            continue;
        elseif (Archivo(MisIndices(s),4) <= MSNM) % Reduce el rango de búsqueda
de los datos desde el número que aparece (en MSNM).
            continue;
        elseif (Archivo(MisIndices(s),4) > AlturaBaja) &&
(Archivo(MisIndices(s),4) <= AlturaAlta); % Condicional para estratificar las
altura.
            EsteIntervaloVel=[EsteIntervaloVel; Archivo(MisIndices(s),8)];
            EsteIntervaloDirSeno=[EsteIntervaloDirSeno; DVSeno(MisIndices(s))];
            EsteIntervaloDirCoseno=[EsteIntervaloDirCoseno;
DVCoseno(MisIndices(s))];
        end % Fin del condicional.
    end

    empty=isempty(EsteIntervaloDirSeno); % Verifica que el vector no esté
vacío.

    if (empty==1) % Si el vector esta vacío se sigue a la siguiente altura.
        continue;
    else % Si no está vacío hacen los cálculos para promediar las
alturas y dejar una sola altura por cada intervalo de alturas.

        CompIntervaloX=EsteIntervaloVel.*EsteIntervaloDirSeno; % Multiplica la
velocidad y la magnitud entrada a entrada para poder facilitar los cálculos.
        CompIntervaloY=EsteIntervaloVel.*EsteIntervaloDirCoseno; % Lo mismo
para la otra dirección.

        MediaInterX=mean(CompIntervaloX); % Se calcula la media de este
vector.
        MediaInterY=mean(CompIntervaloY); % También aquí.
        MagEstaAltura=sqrt(MediaInterX^2+MediaInterY^2); % Se suman las
magnitudes vectorialmente para obtener el vector de velocidad final.
        DirEstaAlt=atan(MediaInterY/MediaInterX); % Saca el ángulo en
radianes.
        DirEstaAltGrad=DirEstaAlt*180/pi; % Se convierte el vector a grados.

        % Este condicional es para no perder la información que arroja
        % el arcotangente, pues esta función sólo está definida de -pi/2
        % hasta pi/2.
        if (MediaInterX > 0) && (DirEstaAlt < 0) % Si los valores son de esta
forma saldrá un valor negativo que en realidad estará entre 270 y 360 grados.
            DirGradosEstaAltura=DirEstaAltGrad+360;
        elseif (MediaInterX < 0) % Si sale este valor entonces
esta entre 90 y 270.
            DirGradosEstaAltura=DirEstaAltGrad+180;
        else
            DirGradosEstaAltura=DirEstaAltGrad;
        end

    end % Fin del ciclo.

```

```

        Multimatriz=[Multimatriz; [unafecha AlturaAlta MagEstaAltura
DirGradosEstaAltura]]; % Se construye una matriz con estos valores

    end % Fin del condicional.

end % Fin del ciclo.

% Aquí tendría que ser capaz de ponerle para cualquier altura y poder
% visualizarla o incluso todas las alturas.
todasdirecciones=[]; % Se crean estos vectores vacíos.
todasvelocidades=[];

%file_cil = fopen('cilindro.dat', 'a'); %Esta instrucción es para abrir un archivo
para escribir los datos del cilindro.

% Se hace un nuevo ciclo para poder graficar todas las alturas en un
% histograma.
for b=1:totaldealturas
    AlturaAlta=MSNM+b*Tamanodelintervalo; % Se hace esta igualdad para encasillar
a todas las alturas de este intervalo.
    indices=find(Multimatriz(:,2) == AlturaAlta); % Se buscan las alturas en la
matriz.
    otravac=isempty(indices); % Verifica que no esté vacía.
    if (otravac==1) % Si está vacía se va con la siguiente altura
        continue;
    else % Si no se hacen estos cálculos.
        cuantos=length(indices);
        for xy=1:cuantos
            todasalturas(xy,b)=Multimatriz(indices(xy),2); % Asigna a todasalturas
todos los renglones que tienen un índice igual a AlturaAlta de la columna 2 de
Multimatriz.
            todasdirecciones(xy,b)=Multimatriz(indices(xy),4); % Asigna a
todasdirecciones todos los renglones que tienen un índice igual a AlturaAlta de la
columna 2 de Multimatriz.
            todasvelocidades(xy,b)=Multimatriz(indices(xy),3); % Asigna a
todasvelocidades todos los renglones que tienen un índice igual a AlturaAlta de la
columna 2 de Multimatriz.

            % Esta parte es para hacer un archivo con los datos para el
            % histograma cilíndrico por si acaso es necesario.
            %fprintf(file_cil,'%f',todasvelocidades(xy,b)); % Inserta las
velocidades que es la magnitud del vector.
            %fprintf(file_cil,'\t'); % Inserta un espacio de tabulador.
            %fprintf(file_cil,'%f',todasdirecciones(xy,b)); % Inserta la
dirección a esta altura que es el ángulo.
            %fprintf(file_cil,'\t'); % Inserta un espacio de tabulador.
            %fprintf(file_cil,'%f',todasalturas(xy,b)); % Inserta la altura que
es la coordenada zeta.
            %fprintf(file_cil,'\n'); % Inserta un salto de línea.

        end % Fin del ciclo.
    end % Fin del condicional.

%% Estas siguientes 8 lineas son para visualizar las gráficas.
% Básicamente, con la instrucción hist puedes visualizar cada una de

```

```

% las gráficas de las alturas por separado.
% Con la instrucción histfit puedes ver la curva de ajuste a los
% histogramas.
% Con la instrucción normfit puedes obtener mudir la media, sigmadir, la
% desviación estandar.
% La instrucción compass es para visualizar el campo de vientos, pero
% como son muchos datos no se ve bien así que decidí dejarlo
% comentado.
% Recuerda que al quitarle el símbolo % al renglón en cuestión vas a
% cambiar un comentario por una instrucción.

%figure
%hist(todasdirecciones(:,b))
%disttodos=histfit(todasdirecciones(:,b),piecewisenumbers,'normal');
[mudir,sigmadir]=normfit(todasdirecciones(:,b),confidence);
[muvel,sigmavel]=normfit(todasvelocidades(:,b),confidence);
%[v,D]=pol2cart(todasdirecciones(:,b),todasvelocidades(:,b));
%figure
%compass(v,D)

% Con estas instrucciones se insertan los valores en el archivo .WIN.
fprintf(file_id,'%f',muvel); % Para insertar el promedio de la velocidad del
viento a esta altura.
fprintf(file_id,'\t'); % Inserta un espacio de tabulador.
fprintf(file_id,'%f',mudir); % Inserta el promedio de la dirección a esta
altura.
% Si se quiere conocer la altura en el archivo se escribe.
%fprintf(file_id,'%t');
%fprintf(file_id,'%f',AlturaAlta);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fprintf(file_id,'\n'); % Inserta una línea.

end % fin del ciclo

fclose(file_id); % Cierra el archivo .WIN abierto para Ashfall.
%fclose(file_cil); % Cierra el archivo .dat para el histograma.

columnasnocero= todasdirecciones(1,:) ~= 0; % Se asegura que las columnas
contengan datos.
%alturas=MSNM+columnasnocero*1000; % Dice cuales columnas si tienen
datos.
figure % Pon una nueva figura
hist(todasdirecciones(:,columnasnocero),piecewisenumbers) % Grafica todas las
alturas juntas. Por supuesto que hay alturas que no hay y esas no las grafica.
title(NombreArchivo,'FontWeight','bold')
xlabel('Ángulo en grados');
ylabel('Frecuencia de los eventos');
colorbar

%Esta instrucción es para graficar un histograma plano en 3 dimensiones
%figure
%hist3([todasdirecciones(:,columnasnocero)],[piecewisenumbers totaldealturas]); % La
primera entrada tiene que ser de n renglones por 2 columnas y la segunda entrada
de 1 renglón por 2 columnas.
%title(NombreArchivo)
%xlabel('Ángulo en grados');

```

```

%ylabel('Frecuencia de la medición');
%ylabel('Altura en metros');
%colormap
%Fin del histograma plano en 3d

%Fin del promedio para todo el mes para cada altura diferente

%% Este pedazo de código es para poder visualizar un histograma cilíndrico
% de los datos, pues me parece que es la manera más natural de verlos
% Este pedazo de código se escribió después del programa original

% Primero hay que agrupar los datos de los ángulos con el valor definido por
% el usuario la variable se llama piecewisenumber.
colordef(figure,'black'); %Pone el color de fondo en negro.
theta_vec=linspace(0,360,piecewisenumber);% Genera un vector con valores igualmente
espaciados de tamaño piecewisenumber.
zeta_vec = linspace(0,totaldealturas,totaldealturas); % Genera totaldealturas
valores entre 1 y totaldealturas incluidos los limites esto es solo para poder
generar la referencia polar.
[theta,zeta] = meshgrid(theta_vec,zeta_vec); % Hace una matriz que relaciona los
dos valores generados antes mostrados antes.
histtheta=[];
th_vec=linspace(0,360,piecewisenumber+1);

% Este ciclo es para crear el vector histtheta que contiene los valores que una
medición se repite en el intervalo deseado. Se puso un condicional para evitar que
las columnas tuvieran valores de cero y solo se tomaran en cuenta las columnas
donde si hubiera valor.
for b=1:numel(zeta_vec)
    if todasdirecciones(1:b)==0
        continue;
    else
        for xy=1:numel(theta_vec)
            otroindice=find((todasdirecciones(:,b) >= th_vec(xy)) &
(todasdirecciones(:,b) <= (th_vec(xy+1))));
            histtheta(xy,b)=numel(otroindice);
        end
    end
end
end

Histmax=max(histtheta(:)); % Calcula el valor máximo del vector histtheta.
%factor=Tamanodelintervalo*totaldealturas/Histmax; % Es un factor para visualizar
la curva lo más cuadrada que se pueda.
%z_vec=linspace(0,Tamanodelintervalo*totaldealturas/factor,totaldealturas+1);
z_vec=linspace(0,Tamanodelintervalo*totaldealturas,totaldealturas+1); % Genera un
vector de valores que incluye el cero, este vector si me sirve ATENCIÓN: ESTE
VECTOR ES MAS IMPORTANTE QUE EL VECTOR zeta_vec, NO SE HA DUPLICADO POR ERROR,
CUMPLEN FUNCIONES DIFERENTES. La diferencia con la instrucción de arriba es que no
tiene añadido el 'factor'. Este factor hace que la gráfica se vea más regular.

polar(nan,max(max(histtheta'.*cosd(theta)))) % Esta función crea una gráfica en
coordenadas polares con ángulo nan y con radio la otra función.
hold all; % Mantiene todos los valores predeterminados para la gráfica.

for b=1:numel(z_vec)-1

```

```

for xy=1:numel(th_vec)-1

    w=tand(piecewisewidth)*histtheta(xy,b); % Esta instrucción es para que
    el histograma se parezca a lo que aparece con la función rose. La instrucción tand
    calcula la tangente del ángulo en grados.
    c=cosd(piecewisewidth); % Esta instrucción tiene la misma función, cosd
    calcula la tangente del ángulo en grados.
    %t=Tamanodelintervalo/factor; % Esta instrucción es por si se necesita
    cambiar el tamaño en zeta.
    t=Tamanodelintervalo;

    X=([0 0 1 0 0;
        c c c c 1;
        c 1 c 1 1;
        0 0 1 0 0])*histtheta(xy,b); % Se define la matriz de valores del
    histograma para la variable X, son 5 columnas porque son 5 caras para hacer un
    histograma en coordenadas polares y son 4 renglones porque cada cara tiene 4
    aristas.

    Y=([0 0 0 0 0;
        w w w w 0;
        w 0 w 0 0;
        0 0 0 0 0]); % Se define la matriz de valores del
    histograma para la Y.

    Z=([0 t t 0 0;
        0 t t 0 0;
        t t 0 0 t;
        t t 0 0 t])+z_vec(b); % Se define la matriz para Z y se le suma el
    valor de zeta_vec para trasladar cada rectángulo.

    h= patch(X,Y,Z,0*X+histtheta(xy,b), 'edgecolor','none'); % Se crean los
    objetos del histograma. La instrucción patch dibuja un polígono con los vértices
    indicados por las coordenadas X,Y,Z pero como cada una de estas variables es una
    matriz entonces se dibuja un polígono por cada columna de la matriz de puntos,
    entonces tenemos 5 cuadrados en total.
    rotate(h,[0 0 1],th_vec(xy),[0 0 0]); % Se rota todo alrededor del eje
    z una cantidad igual a la que tiene el vector theta_vec.

end % Fin del condicional.
end % Fin del condicional.

% Esto es para ajustar la gráfica del histograma cilíndrico.
[Xc,Yc,Zc] = cylinder(1,piecewisenumber); % Crea un cilindro de radio 1, con un
numero de divisiones laterales iguales a piecewisenumber.
%hc =surf(Histmax*Xc,Histmax*Yc,Tamanodelintervalo*totaldealturas*Zc/factor); % Le
da el tamaño al cilindro en cada uno de los ejes.
hc = surf(Histmax*Xc,Histmax*Yc,Tamanodelintervalo*totaldealturas*Zc); % Le da el
tamaño al cilindro en cada uno de los ejes.
set(hc,'facecolor','none','edgecolor','w','edgealpha',0.2) % Ajusta los datos de la
gráfica.
set(gca,{'xtick' 'ytick' 'ztick' 'vis' 'clim'},{[] [] [] 'on' [0 Histmax]});
%set(gca,'Ztick',z_vec)
set(gca,'Ztick',[0 Tamanodelintervalo*totaldealturas/4
Tamanodelintervalo*totaldealturas/2 Tamanodelintervalo*totaldealturas*3/4
Tamanodelintervalo*totaldealturas])
%set(gcf,'Renderer','opengl'); % Hace compatible la gráfica con opengl

```

```

axis normal; % Ajusta los ejes de manera que se vean cuadrados.
title(NombreArchivo, 'FontWeight', 'bold') % Le pone título a la gráfica.
xlabel('Los colores representan el número de veces que se registró la medición')
gtext('Dirección del viento, 0° es el norte, 90° el oeste, 180° el sur, 270° el
este.')
zlabel('Altura en MSNM')
box on; % Se activa la gráfica.
view(3) % Pone la figura en 3 dimensiones.
colorbar % Pone la barra de colores de un lado.
drawnow; % Dibuja la gráfica.
%saveas(hs, 'cilindro.jpg'); % Se salva la imagen a un archivo jpg, aunque tal vez
dejaré comentada esta instrucción.
% Aquí se acaba el código para graficar el histograma cilíndrico.

%% Promedio para cada medición y con todas las alturas juntas. Aunque este
%% cacho de código no es muy útil, da una idea general de cómo trabaja el
%% código en forma general. Al final se puede conocer el valor
%% predominante en la zona a lo largo del año.

totalArchivo=length(Fechas);

for i=1:totalArchivo

    % Condiciones sobre los datos. La columna 7 tiene la direcciÃ³n en grados y la
    8 la velocidad en metros sobre segundo.
    if (Archivo(i,7) == sindato) % Si en la columna de la velocidad del viento está
el valor 99999, quiere decir que en realidad no hay datos, entonces se lo salta.
        continue;
    elseif (Archivo(i,4) <= MSNM) % Reduce el rango de búsqueda de los datos desde
el número que aparece (en MSNM).
        continue;
    else
        VelViento=[VelViento; Archivo(i,8)]; % Asigna a VelocidadViento la
velocidad del viento que está en la columna 8 del archivo original. La velocidad
del viento está en metros sobre segundo.
        DirViento=[DirViento; Archivo(i,7)]; % Asigna la dirección del viento del
Archivo al vector DirViento

        end % fin del condicional línea

end

DirViento=DirViento*2*pi/360; % convierte la columna DirViento a radianes pues
matlab saca el seno y el coseno en radianes.
DirVientoX=cos(DirViento); % Sacar el coseno de cada entrada de radDirViento y lo
pone en DirVientoX.
DirVientoY=sin(DirViento); % Sacar el seno de cada entrada de radDirViento y lo
pone en DirVientoY.
ComponenteX=VelViento.*DirVientoX; % Multiplica los vectores velocidadViento y
DirVientoX entrada a entrada y lo asigna a componenteVientoX.
ComponenteY=VelViento.*DirVientoY; % Lo mismo con la componente Y.
MediaComponenteX=mean(ComponenteX); % Hace el promedio de las componentes en X.
MediaComponenteY=mean(ComponenteY); % Ahora hace lo mismo en Y.

```

```
MagnitudMensual=sqrt(MediaComponenteX^2+MediaComponenteY^2); % Saca la magnitud
del vector en metros sobre segundo.
DireccionMensual=atan(MediaComponenteY/MediaComponenteX); % Saca el ángulo en
radianes.
DireccionMensual=DireccionMensual*360/(2*pi);

if (MediaComponenteX > 0) && (DireccionMensual < 0)
    DireccionMensual=DireccionMensual+360;
elseif (MediaComponenteX < 0)
    DireccionMensual=DireccionMensual+180;
end

end % Fin del programa.
```

Apéndice B.7

Programa para Ashfall 2, vientos sintéticos Valle de México

```
%PROGRAMA PARA ANALIZAR DATOS DE VIENTOS
%REALIZADO POR ERIC BENJAMÍN TÉLLEZ UGALDE erictellez@gmail.com
erictellez@hotmail.com
%Junio 2012

%% *****% 1. NOMBRE DEL PROGRAMA Y ENTRADA DE DATOS *****
function VientosIsrael5(NombreArchivo)

Hoja1=xlsread(NombreArchivo,'Hoja1','B106:C13805'); % Carga los datos del archivo
que está en formato de Excel. En este caso los datos son la velocidad y la
dirección del viento en dos columnas.
DV=Hoja1(:,1); %Asigna a DV la dirección del viento de las mediciones originales

Hoja2=xlsread(NombreArchivo,'Hoja2','A2:F3217'); % Carga los datos del archivo que
está en formato de Excel. En este caso los datos son la fecha, la hora, la
velocidad del viento y la dirección del viento.
%Archivo= load(NombreArchivo); % carga el archivo
Fechaconhora=Hoja2(:,1); %Asigna a fechaconhora la columna 1
Fechas=Hoja2(:,2); %Asigna a fechas la columna de las fechas
Horas=Hoja2(:,3); %Asigna a horas la columna de las horas
WD2=Hoja2(:,5); %Toma la columna de direcciones y las asigna a WD2

cajas=input('¿Cada cuantos grados quieres agrupar el campo de vientos?. El valor
por defecto es de 30 grados: ');
vac3=isempty(cajas);
if (vac3==1)
    cajas=30;
end
%Precisión del intervalo en que estará dividido cada ángulo
numerocajas=360/cajas; %es el número total de intervalos

%% *****% 2. ANALISIS DE DATOS*****

%% Calculos para el programa NOVAC, todavía no se como se insertan
%rotacion=90-DV;
%radianes=pi*DV./180;
%file_id = fopen('novac.dat', 'a'); %Esta instrucción es para abrir un
%archivo y escribir en él, llamado novac.dat
%xlswrite('novac.xls',[rotacion radianes]);
%file_id =fclose('novac.dat', 'a');
%% Aquí se acaba el código de NOVAC

totalceldas1=length(Hoja1(:,1)); %Instrucción para el total de celdas de la hoja 1
%Con esta instrucción voy a convertir el sistema de fechas numérico de
%Excel al de Matlab que están en la hoja 2
Fechaconhora = Fechaconhora + datenum('30-Dec-1899');
totalceldas2=length(Fechaconhora); %longitud del archivo
Fechasunicas = unique(Fechaconhora); % busca dentro de fechas, las fechas que son
diferentes o únicas y lo asigna a FechasUnicas, es decir, FechasUnicas es un
vector en el que cada entrada contiene cada fecha diferente del archivo
totfechas = length(Fechasunicas); % busca la longitud del vector anosunicos y el
total se lo asigna a totanos
```



```

%hasta pi/2. Verifica entrada a entrada lo que tiene el vector ángulo y le
%asigna la conversión correspondiente
    if (promedioternaX(d) > 0) && (angulo(d) < 0)    %si los valores son de esta
forma saldra un valor negativo que en realidad estara entre 270 y 360 grados
        angulo(d)=angulo(d)+360;
    elseif (promedioternaX(d) < 0)                    % si sale este valor entonces
esta entre 90 y 270
        angulo(d)=angulo(d)+180;
    else
        angulo(d)=angulo(d);    %Deja el angulo igual en otro caso
    end
end

%% Estas siguientes líneas son para visualizar las gráficas.
%% Puede ser un histograma o una rosa o un campo vectorial
figure
rose(angulo,numerocajas)    %grafica una histograma polar.
title(NombreArchivo,'FontWeight','bold')
xlabel('Ángulo en grados');
ylabel('Frecuencia de los eventos');
figure
compass(promedioternaX, promedioternaY)    %Un campo de vientos, pero son muchos
%datos y se va a atascar la gráfica.

% Este ciclo for es para hacer el promedio diario
promediodiarioX=[];
promediodiarioY=[];
for d=1:4:length(promedioternaX)
    promediodiarioX=[promediodiarioX; mean(promedioternaX(d):promedioternaX(d+3))];
    promediodiarioY=[promediodiarioY; mean(promedioternaY(d):promedioternaY(d+3))];
end

angulodiario=atand(promediodiarioY./promediodiarioX);    %Saca el ángulo con la
función arcotangente y luego lo convierte a grados
%Ciclo para convertir todos los ángulos provenientes de la tangente
for d=1:length(angulodiario)
%Este condicional es para no perder la información que arroja
%el arcotangente, pues esta función sólo está definida de -pi/2
%hasta pi/2. Verifica entrada a entrada lo que tiene el vector ángulo y le
%asigna la conversión correspondiente
    if (promediodiarioX(d) > 0) && (angulodiario(d) < 0)    %si los valores son de
esta forma saldra un valor negativo que en realidad estara entre 270 y 360 grados
        angulodiario(d)=angulodiario(d)+360;
    elseif (promediodiarioX(d) < 0)                    % si sale este valor entonces
esta entre 90 y 270
        angulodiario(d)=angulodiario(d)+180;
    else
        angulodiario(d)=angulodiario(d);    %Deja el angulo igual en otro caso
    end
end

%% Estas siguientes líneas son para visualizar las gráficas.
%% Puede ser un histograma o una rosa o un campo vectorial
figure
rose(angulodiario,numerocajas)    %grafica una histograma polar.
title(NombreArchivo,'FontWeight','bold')
xlabel('Ángulo en grados');

```

```

ylabel('Frecuencia de los eventos');
figure
compass(promediodiarioX, promediodiarioY) %Un campo de vientos, pero son muchos
%datos y se va a atascar la gráfica.

numerodeperiodos=input('¿En cuántos periodos de tiempo vas a dividir el año?:
');
for x=1:numerodeperiodos
periodoinicio=input('Da la fecha de inicio del periodo en formato mm/dd/aaaa:
','s');
periodofin=input('Da la fecha de término del periodo en formato mm/dd/aaaa:
','s');
nombreperiodo=input('Escribe el nombre del periodo: ','s');
periodoiniciomatlab=datenum(periodoinicio);
periodofinmatlab=datenum(periodofin);

fechainicio= find(diasunicos==periodoiniciomatlab);
fechafin= find(diasunicos==periodofinmatlab);
anguloestacional=[];
for f=fechainicio:fechafin
anguloestacional=[anguloestacional,angulodiario(f)];
end

%% Estas siguientes líneas son para visualizar las gráficas.
%Puede ser un histograma o una rosa o un campo vectorial
figure
rose(anguloestacional,numerocajas) %grafica una histograma polar.
title(nombreperiodo,'FontWeight','bold')
xlabel('Ángulo en grados');
ylabel('Frecuencia de los eventos');
%No estoy seguro de esta función
%figure
%compass(promediodiarioX(fechainicio:fechafin),
promediodiarioY(fechainicio:fechafin)) %Un campo de vientos, pero son muchos
%datos y se va a atascar la gráfica.

end %Fin del ciclo para periodos iguales

end %fin del programa

```

Apéndice B.8

Programa para Ashfall 3, El Chichón

```
%PROGRAMA PARA ANALIZAR LOS DATOS QUE SE OBTIENEN DEL SITIO DE READY.NOAA.GOV. EN
ESPECIAL PARA PROCESAR LOS DATOS OBTENIDOS DE LOS VIENTOS Y HACER UN ANÁLISIS
PROBABILÍSTICO DE LA DIRECCIÓN Y LA VELOCIDAD PREDOMINANTE DE ESTE EN LAS
DIFERENTES ESTACIONES DEL AÑO. LOS DATOS QUE SE TIENEN AQUÍ SON DE LOS VIENTOS
POR ENCIMA DEL VOLCÁN PICO DE ORIZABA
%REALIZADO POR ERIC BENJAMÍN TALLEZ UGALDE erictellez@gmail.com
erictellez@hotmail.com
%INICIADO EN ABRIL DEL 2011

%% *****% 1. NOMBRE DEL PROGRAMA Y ENTRADA DE DATOS *****
function VientosNoe(NombreArchivo)

Archivo= load(NombreArchivo); % carga el archivo
Anos = Archivo(:,11); % asigna todos los renglones de la columna 11 al vector
anos
Meses= Archivo(:,9); % asigna todos los renglones de la columna 9 al vector meses
Dias= Archivo(:,8); asigna todos los renglones de la columna 8 al vector días
Horas= Archivo(:,10); % asigna todos los renglones de la columna 10 al vector horas
DV=Archivo(:,6); %Toma la columna de direcciones y las asigna a DireccionesViento

%% *****% 2. ANALISIS DE DATOS*****

%con esta linea voy a poner todas las fechas como un número para poder tratarlas
mejor
Fechas=Anos*1000000+Meses*10000+Dias*100+Horas;
%FechasOrdenadas=sort(Fechas); %para ordenar las fechas de menor a mayor
sindato=99999; %asegura que todos los valores en la matriz sean valores buenos

Fechasunicas = unique(Fechas); % busca dentro de fechas, las fechas que son
diferentes o únicas y lo asigna a FechasUnicas, es decir, FechasUnicas es un
vector en el que cada entrada contiene cada fecha diferente del archivo
totfechas = length(Fechasunicas); % busca la longitud del vector anosunicos y el
total se lo asigna a totanos

%Introduccion de variables vectoriales vacias, tendrían que ser variables
%globales de preferencia para que las evalúe cada celda.
VelViento=[]; %se crea el vector para las velocidades que están en metros
sobre segundo
DirViento=[]; %Se crea el vector para el ángulo de la dirección que está en
radianes

#####
%aquí se va a escribir en el archivo .WIN para que se pueda leer en ashfall
file_id = fopen('vientoprueba.WIN', 'a'); %Esta instrucción es para abrir un
archivo y escribir en él.
#####

MSNM=input('¿A qué altura está la estación, el volcán o desde qué altura quieres
empezar a calcular?. Valor por defecto 0 metros: '); %con esta instrucción puedo
hacer que se
%MSNM=13; %aquí debe ir la altura desde la que empieza la medición, como
es para el caso del volcán chichonal deberá estar aquí la altura de
```



```

DV=DV*pi/180;
DVSeno=sin(DV);
DVCoseno=cos(DV);

% Empieza un ciclo para analizar todas las fechas diferentes
for i=1:totfechas

    unafecha=FechasUnicas(i); % asigna a la variable unafecha el valor de la
    entrada i de FechasUnicas
    MisIndices=find(Fechas==unafecha); % Busca dentro de Anos las que son iguales a
    unano y los indices que pertenecen a esos anos iguales se lo asigna a indicesanos,
    entonces, indicesanos es un vector que tiene los indices de anos iguales para este
    ano en particular
    cuantasestafecha=length(MisIndices);

    for b=1:totaldealturas+1
        AlturaBaja=MSNM+(b-1)*Tamanodelintervalo; %estas variables definen el
        intervalo de partici3n de las alturas
        AlturaAlta=MSNM+b*Tamanodelintervalo;

        EsteIntervaloVel=[]; % se crean estos vectores vacios para un promedio de
        datos peque1o
        EsteIntervaloDirSeno=[];
        EsteIntervaloDirCoseno=[];

        for s=1:cuantasestafecha

            % condiciones sobre los datos. La columna 7 tiene la direcci3n en
            grados y la 8 la velocidad en metros sobre segundo
            if (Archivo(MisIndices(s),7) == sindato) % si en la columna de la
            velocidad del viento est3; el valor 99999, quiere decir que en realidad no hay
            datos, entonces se lo salta
                continue;
            elseif (Archivo(MisIndices(s),3) <= MSNM) %reduce el rango de busqueda
            de los datos desde el numero que aparece (en MSNM)
                continue;
            elseif (Archivo(MisIndices(s),3) > AlturaBaja) &&
            (Archivo(MisIndices(s),3) <= AlturaAlta); %condicional para estratificar las altura
                EsteIntervaloVel=[EsteIntervaloVel; Archivo(MisIndices(s),7)];
                EsteIntervaloDirSeno=[EsteIntervaloDirSeno; DVSeno(MisIndices(s))];
                EsteIntervaloDirCoseno=[EsteIntervaloDirCoseno;
            DVCoseno(MisIndices(s))];
            end % fin del condicional linea 91
        end

        empty=isempty(EsteIntervaloDirSeno); %Verifica que el vector no est3 vacio

        if (empty==1) %si el vector esta vacio se sigue a la siguiente altura
            continue;
        else %si no esta vacio hace los calculos para promediar las
        alturas y dejar una sola altura por cada intervalo de alturas

            CompIntervaloY=EsteIntervaloVel.*EsteIntervaloDirSeno; %Multiplica la
            velocidad y la magnitud entrada a entrada para poder facilitar los c3lculos

```

```

        CompIntervaloX=EsteIntervaloVel.*EsteIntervaloDirCoseno; %lo mismo
para la otra direcci3n

        MediaInterX=mean(CompIntervaloX); %Se calcula la media de este vector
        MediaInterY=mean(CompIntervaloY); %tambien aqui
        MagEstaAltura=sqrt(MediaInterX^2+MediaInterY^2); % Se suman las
magnitudes vectorialmente para obtener el vector de velocidad final
        DirEstaAlt=atan(MediaInterY/MediaInterX); %Saca el 3ngulo en radianes
        DirEstaAltGrad=DirEstaAlt*180/pi; %se convierte el vector a grados

        %Este condicional es para no perder la informaci3n que arroja
        %el arcotangente, pues esta funci3n s3lo est3 definida de -pi/2
        %hasta pi/2
        if (MediaInterX > 0) && (DirEstaAlt < 0) %si los valores son de esta
forma saldra un valor negativo que en realidad estara entre 270 y 360 grados
            DirGradosEstaAltura=DirEstaAltGrad+360;
        elseif (MediaInterX < 0) % si sale este valor entonces
esta entre 90 y 270
            DirGradosEstaAltura=DirEstaAltGrad+180;
        else
            DirGradosEstaAltura=DirEstaAltGrad;
        end

        end %fin del ciclo linea 112

        Multimatriz=[Multimatriz; [unafecha AlturaAlta MagEstaAltura
DirGradosEstaAltura]]; %se construye una matriz con estos valores

        end %fin del condicional linea 92

end %fin del ciclo linea 90

%Aqu3 tendr3a que ser capaz de ponerle para cualquier altura y poder
%visualizarla o incluso todaz las alturas
todasdirecciones=[]; % se crean estos vectores vac3os
todasvelocidades=[];

%Se hace un nuevo ciclo para poder graficar todas las alturas en la misma
%gr3fica
for b=1:totaldealturas+1
    AlturaAlta=MSNM+b*Tamanodelintervalo;
    var=find(Multimatriz(:,2) == AlturaAlta); %se buscan las alturas en la matriz
    otravac=isempty(var); %verifica que no este vac3a
    indices=[];
    if (otravac==1) % si esta vac3a se va con la siguiente altura
        continue;
    else % si no se hacen estos claculos
        indices=find(Multimatriz(:,2) == AlturaAlta);
        cuantos=length(indices);
        for xy=1:cuantos
            todasalturas(xy,b)=Multimatriz(indices(xy),2);
            todasdirecciones(xy,b)=Multimatriz(indices(xy),4);
            todasvelocidades(xy,b)=Multimatriz(indices(xy),3);
        end
    end
end
end

```

```

[cuentasdir,posdir]=hist(todasdirecciones(:,b),piecewisenumbr);
%cuentasdir=frecuenciad de la direccion posdir=direcciones
% si posdir=12 (360/30=12), hist va a compartir el intervale
% [max(todasdirecciones, min(todasdirecciones)] en 12 intervalos de
% tamaños iguales, y de centro posdir
[maxdir,Idir]=max(cuentasdir); %maxdir=max de frecuencia, Idir=indice de este
valor max
d=round(posdir(Idir)); %d=direccion donde hay el max de frecuencia, con la
funcion round se redondea al valor entero mas proximo
[cuentasvel,posvel]=hist(todasvelocidades(:,b),piecewisenumbr);
[maxvel,Ivel]=max(cuentasvel);
v=round(posvel(Ivel)); %velocidad la mas frecuente

%con estas instrucciones se insertan los valores en el archivo .WIN
fprintf(file_id,'%f',v); %Para insertar el promedio de la velocidad del
viento a esta altura
fprintf(file_id,'\t'); % inserta un espacio de tabulador
fprintf(file_id,'%f',d); %Inserta el promedio de la direccion a esta altura
%si se quiere conocer la altura en el archivo se escribe
fprintf(file_id,'%t');
fprintf(file_id,'%f',AlturaAlta);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fprintf(file_id,'\n'); %inserta una linea
end

columnasnocero=find(todasdirecciones(1,:) ~= 0); %se asegura que las columans
contengan datos
alturas=MSNM+columnasnocero*1000; % dice que columnas si tienen
datos
figure % pone una nueva figura
hist(todasdirecciones(:,columnasnocero),piecewisenumbr) %grafica todas las
alturas juntas. Por su puesto que hay alturas que no hay y esas no las grafica
title(NombreArchivo)
xlabel('Ángulo en grados');
ylabel('Número de veces que el viento tuvo esta dirección');
colorbar
%Fin del promedio para todo el mes para cada altura diferente

fclose(file_id); %cierra el archivo abierto

end % fin del programa

```

Apéndice B.9

Programa para Ashfall 4, Popocatépetl

```
%PROGRAMA PARA ANALIZAR DATOS DE RADIOSONDEOS SINTÉTICO DE VIENTOS DEL POPO
%REALIZADO POR ERIC BENJAMÍN TÉLLEZ UGALDE erictellez@gmail.com
erictellez@hotmail.com
%SEPTIEMBRE 2012

%% *****% 1. NOMBRE DEL PROGRAMA Y ENTRADA DE DATOS *****
function VientosRobinPopo(NombreArchivo)

Hojal=xlsread(NombreArchivo,'CONVELOCIDAD','B3:C30023'); % Carga los datos del
archivo que está en formato de Excel. En este caso los datos son la velocidad y la
dirección del viento en dos columnas.
DV=Hojal(:,1); %Asigna a DV la dirección del viento de las mediciones originales
VV=Hojal(:,2); %Asigna a VV la velocidad del viento de las mediciones originales
Alturas=[5120 5880 6700];
fechainicio=datenum('01-Nov-2007');
ternaVV=[];
ternaDV=[];

totalceldas=length(Hojal(:,1));
totalfechas=totalceldas/17;

disp('Las fechas van desde el Nov/01/2007 hasta Ago/31/2012')
disp('Todas las fechas tienen horas de 12, 15, 18 y 21 hrs GMT')

otra='s';
while (otra=='s')
vac=1;
    while vac==1
        thisdate=input('¿Qué día quieres analizar? Escribe la fecha en formato
mm/dd/aaaa: ','s'); %Se pide la fecha
        vac=isempty(thisdate);
        disp('Ingresa una fecha')
        end

Date=datenum(thisdate);
while (Date<fechainicio && Date>totalfechas+fechainicio)
    disp('No hay datos para esa fecha, intenta otra fecha')
end

celdadefecha=(Date-fechainicio)*17;
stunde=input('Escribe la hora GMT que quieres, 12, 15, 18, 21: ');
while (stunde~=12 && stunde~=15 && stunde~=18 && stunde~=21)
    disp('La hora no es correcta intenta de nuevo')
end %fin del while

if stunde==12
    celdadefecha=celdadefecha+1;
elseif stunde==15
    celdadefecha=celdadefecha+5;
elseif stunde==18
    celdadefecha=celdadefecha+9;
```

```

elseif stunde==21
    celdadefecha=celdadefeca+13;
end %fin del condicional

for th=celdadefecha:celdadefecha+2      %Este ciclo es para construir la terna
    ternaVV=[ternaVV; VV(th)];
    ternaDV=[ternaDV; DV(th)];
end %fin diclo for

%% ***** 3. Salida de datos *****
#####
%aquí se va a escribir en el archivo .dat para que se pueda hacer otra cosa
Alturas=Alturas';
A=[Alturas ternaDV ternaVV];
csvwrite('fecha.dat',A);
#####

%Para graficar la dirección contra la altura y la velocidad contra la
%altura
figure
scatter(ternaDV,Alturas)
title(Date,'FontWeight','bold')
xlabel('Ángulo (grados)');
ylabel('Altura (m)');
figure
scatter(ternaVV,Alturas)
title(Date,'FontWeight','bold')
xlabel('Velocidad (m/s)');
ylabel('Altura (m)');

otra=input('¿Quieres procesar otra fecha? s/n ','s');

end %fin del ciclo while

end %Fin del programa

```

Bibliografía

Parte A

Adem, J., 1961: *On the theory of the general circulation of the atmosphere*, Tellus, 14:1, 102-115, DOI: 10.3402/tellusa.v14i1.9532

Bracewell, R. N., 2000: *The Fourier Transform and Its Applications*, 3rd ed., Boston: McGraw-Hill.

Cai, W., and Coauthors. 2014. *Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming*. Nat. Clim. Change, 4, 111-116.

Carleton, Tamma A.; Hsiang, Solomon M., 2016: *Social and economic impacts of climate*, Science, Vol. 353, Issue 6304, aad9837.

Chatfield, C. 2004: *The Analysis of Time Series: An Introduction*, Texts in Statistical Science, 6th ed., London: Chapman & Hall/CRC.

Committee on the Science of Climate Change, 2001: *Climate Change Science: An Analysis of Some Key Questions*, Division on Earth and Life Studies, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC.

CONAGUA, 2018: Servicio Meteorológico Nacional, <http://smn1.cna.gob.mx/radiosondeo/doc/radio.html> Consultado en octubre de 2018.

CONAGUA, 2018: Servicio Meteorológico Nacional, <http://smn1.conagua.gob.mx/radiosondeo/doc/refer.html> Consultado en octubre de 2018.

CONAGUA, 2018: Servicio Meteorológico Nacional, <http://smn.cna.gob.mx/es/variables-meteorologicas> Consultado en octubre de 2018

Cortés, J., 2009: *Evolución espacio-temporal de la superficie del glaciar norte del volcán Citlaltépetl utilizando sensores remotos*, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría.

Critchfield, H., 1983: *General Climatology*, Prentice Hall, 4ta edición, p. 3-13.

Delgado Granados, H., 1997: *The glaciers of Popocatépetl volcano (Mexico): changes and causes*. Quaternary International, 43/44: 53-60.

Delgado Granados, H., Arciniega Dettmer, R. and Calvario Benítez, D., 1985: *Los glaciares del Popocatépetl y el Iztaccíhuatl*, GEOS Boletín: Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, Oaxaca, pp. 16.

Delgado Granados, H., 2007: *Climate change vs. Volcanic activity: Forcing mexican glaciers to extinguish and related hazards*. Proceedings of the First International Conference on Impact of

Climate Change on High Mountain Systems. Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales. Ideam-Bogotá, Colombia, pp. 152-168.

Delgado Granados, H., Huggel, C., Julio Miranda, P., Cárdenas González, L., Ortega del Valle, S., Alatorre Ibarquengoitia, M. A., 2006: *Chronicle of a death foretold: extinction of the small size tropical glaciers of Popocatepetl volcano (México)*. Global and Planetary Change.

Eaton, J. W., Bateman, D., Hauberg, S., Wehbring, R. 2018: *GNU Octave. A High level interactive language for numerical computations*. Edition 4 for Octave version 4.4.1.

Falk, M (ed.). 2012: *A first course on Time series analysis. Examples with SAS*, by Chair of Statistics, University of Würzburg, Version 2012.August.01.

Francou, B., Ribstein, P., Sémiond, H., Portocarreto, C., and Rodriguez, A., 1995: *Balances de glaciares y clima en Bolivia y Perú: impacto de los eventos ENSO*, Bulletin de l'Institute Français d'Études Andines 24(3), p. 661-670.

Google Earth, <https://www.google.com/earth/index.html> Consultado en 2012.

Haeberli, W., Hoelzle, M., Paul, F., Zemp, M., 2007: *Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps*, Annals of Glaciology, Volume 46, pp.150-160.

Hambrey, M., Alean, J., 2004: *Glaciers*. Cambridge University, Cambridge, 376p.

Hegerl, G. C., et al., 2010: Good practice guidance paper on detection and attribution related to anthropogenic climate change. In: *Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Detection and Attribution of Anthropogenic Climate Change* [T. F. Stocker, et al. (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, 8 pp.

Huggel, C., Delgado, H., 2000, Glacier monitoring at Popocatepetl volcano, México: glacier shrinkage and possible causes, In: Hegg, Ch., Vonder Mulh, D. (Eds.): *Beitrag zur Geomorphologie*, Proceedings der Frachtagung der Schweizerischen Geomorphologischen vom 8-10.

IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfeld (eds.)]. In Press

Julio Miranda, P., Delgado Granados, H., 2003: *Fast Hazard evaluation employing digital photogrammetry: Popocatépetl glaciers*. Mexico Geofísica International, Vol., 42, Num. 2 pp. 275-283.

Kääb, A., 2002: *Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air and spaceborne optical data: examples using digital aerial imagery and ASTER data*. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 57 (1-2), pp. 39-52.

Kaser, G., Georges, C., Juen, I., Mölg, T., 2003: *Low Latitude Glaciers: Unique Global Climate Indicators and Essential Contributors to Regional Fresh Water Supply. A conceptual Approach*. Tropical Glaciology Group, Department of Geography, Innsbruck University, 6020 Innsbruck, Austria.

Kaser, G., Hardy, D. R., Mölg, T., Bradley, R. S., Hyera, T. M., 2004: *Modern glacier retreat on Kilimanjaro as evidence of climate change: observations and facts*, International Journal of climatology, Volume 4, Issue 3, pp. 329-339.

Kaser, G., Osmaston, H., 2002: *Tropical Glaciers*, Cambridge University Press, p. 17-39.

Kuhn, M., Markl, G., Kaser, G., Nickus, U. and Obleitner, F., 1985: *Fluctuations of climate and mass balance, Different responses of two adjacent glaciers*, Glazialgeologie 2, p.409-416.

Lorenzo, J. L., 1964: *Los glaciares de México*, Universidad Nacional Autónoma de México, Monografías del Instituto de Geofísica.

Magaña, V., Pérez, J. L., Vázquez, J. L., Carrisoza, E. y Pérez, J., 1999: *2. El Niño y el clima. En: Los impactos de El Niño en México*. En Magaña R.V.O. (Ed.). Sep-CONACYT. 229 pp.

Meteosort, 2009: Estación de radiosondeos,
<http://www.meteosort.com/meteosort/cas/estacioradiosondatge.htm>

Moran, J., and Morgan, M., 1997: *Meteorology, the atmosphere and science of weather*, Prentice Hall, 5th edition, p. 10-30.

NOAA, 2018: Earth System Research Laboratory, <https://esrl.noaa.gov/raobs> Consultado en abril de 2018.

NOAA, 2018: Earth System Research Laboratory, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/> Consultado en abril de 2018

NOAA, 2018: National Ocean Service, <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ninonina.html> Consultado en junio de 2018.

NOAA, 2018: National Weather Service, <https://www.weather.gov/upperair/factsheet> Consultado en octubre de 2018.

NOAA, 2018: National Weather Service,
https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_change.shtml Consultado en agosto de 2018.

NOAA, 2018: National Weather Service,
https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
Consultado en agosto de 2018.

Oerlemans, J., 2001: *Glaciers and climate change*, Balkema Publishers Lisse., 148 p.

Ontiveros, G., 2007: *Balance de energía en la superficie del glaciar norte del volcán Popocatepetl*, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría.

Organización Meteorológica Mundial, *Código FM-35-X, Manual de claves*, publicación N° 306
<http://observacion-atmosfera.at.fcen.uba.ar/practicas/Documento%20MM%20-%20Claves.pdf>

Paterson, W. S. B., 1994: *The physics of glaciers*, 3rd edition, Pargamon, Oxford, Oxford England, Capítulos, 2, 4, 10.

Pérez, A., 2010: *Evolución de la isoterma 0 °C en el valle de México desde 1950 y su relación con el cambio climático*, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de licenciatura.

Quintas, I., Herrera, G., 1998: *Base de datos histórica de radiosondeos*, IMTA y SMN.

Reporte Mexicano de Cambio Climático, 2015: [Gay, C., Rueda, J., (coord.)] *Capítulo 10 Detección y atribución de cambio climático*. Estrada, F., Gay, C., Díaz, F., Conde, A., Martínez, B., Pavia, G., Sánchez, G., Zavala, J.

Reporte Mexicano de Cambio Climático, 2015: Gay, C., Rueda, J., (coord.) *Capítulo 12 Fenómenos climáticos y su relevancia para el cambio climático regional futuro*. Romero, L., Kenton, D., Amador, J., Castro, C., Cavazos, M., Garduño, R., Lizárraga, C., Mendoza, V., Pavia, G.

Reinisch, B., 2000, *Radio sounding of Geospace plasmas*, University of Massachusetts, Lowell, p. 1-3.

Sánchez-Lugo, A., Kennedy, J.J. and Berrisford, P. (2011). *Global Climate, Surface Temperatures in State of the Climate 2010*. Bulletin of the American Meteorological Society 92 (6), S36-S37.

Smithsonian Institution, National Museum of Natural History, Global Volcanism Program, 2018.
<https://volcano.si.edu/world/volcano.cfm?vnum=1401-082> Consultado en agosto de 2018.

Swamidass P.M. (eds): 2000: *MEAN ABSOLUTE PERCENTAGE ERROR (MAPE)*, Encyclopedia of Production and Manufacturing Management. Springer, Boston, MA.

Téllez, Eric B., Delgado, H., Pérez, A. 2010: *Determinación automatizada de la isoterma 0 °C en la atmósfera y su comparación con el retroceso del glaciar Jamapa en el Citaltépétl*, Memorias del Congreso Anual de la Unión Geofísica Mexicana.

Téllez, Eric B., Cortés, J., Delgado, H., 2013: *Análisis predictivo de la desaparición de los glaciares del Iztaccíhuatl y del Pico de Orizaba mediante desestacionalización de series de tiempo*, Memorias del Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático.

The MathWorks Inc., 2018: *MATLAB Primer*.

The MathWorks Inc., 2018: User community. [Www.mathworks.com/matlabcentral](http://www.mathworks.com/matlabcentral) Consultado en abril de 2018.

USAF, 1986: *USAFETAC CLIMATIC DATABASE, User Handbook*, Environmental technical Applications Center, Asheville.

USA Government, <https://catalog.data.gov/dataset/climate-prediction-center-cpcoceanic-nino-index>, consultado en agosto de 2018.

Vazquez, A, <http://slideplayer.es/slide/1129575/> Consultado el 2 de febrero de 2019

Parte B

American Meteorological Society , 2015: Glossary of Meteorology, http://glossary.ametsoc.org/wiki/Wind_shears Recuperado el 2 de febrero de 2019.

Conrad, K., 2018: *Probability distributions and maximum entropy*. <https://kconrad.math.uconn.edu/blurbs/analysis/entropypost.pdf> Consultado en agosto de 2018.

Dadic, R., Mott, R., Lehning, M., Burlando., P., 2010: *Wind influence on snow depth distribution and accumulation over glaciers*, JGR Earth Surface, Volume 115, Issue F1.

Delgado Granados, 2001: *Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Instituto de Geofísica, UNAM, agosto 2001.

Eaton, J. W., Bateman, D., Hauberg, S., Wehbring, R. 2018: *GNU Octave. A High level interactive language for numerical computations*. Edition 4 for Octave version 4.4.1.

Fischer., N.I, 1993: *Statistical analysis of circular data*, Cambridge University Press, Cambridge.

INECC, 2015: *Informe final Estudios de calidad del aire y su impacto en el centro de México 2015*, Instituto nacional de ecología y cambio climático, Ciudad de México, p. 325.

Rivera, M, 2011: *Despierta el Popo: fumarola de 3 km de altura*, La Crónica. <http://www.cronica.com.mx/notas/2011/583098.html> Consultado el 2 de febrero de 2019.

La Vanguardia, 2018: *La enorme fumarola del volcán Popocatépetl tras el terremoto de México* <https://www.lavanguardia.com/vida/20180217/44849475661/volcan-popocatepetl-terremoto-mexico.html> Consultado el 2 de febrero de 2019.

Lutgens, Frederick K. and Tarbuck, Edward J., 2000: *Essentials of Geology*, 7th Ed., Prentice Hall, capítulo 12.

NOAA, 2018: Earth System Research Laboratory, <https://esrl.noaa.gov/raobs> Consultado en abril de 2018.

Quintas, I., Herrera, G., 1998: *Base de datos histórica de radiosondeos*, IMTA y SMN.

Stull, R., 2015: *Meteorology for Scientists and Engineers*, 3rd Edition, Brooks / Cole, pp. 528.

Taneja, I. J., 2001, *Differential Entropy and Probability Distributions*. <http://www.mtm.ufsc.br/~taneja/book/node14.html> Consultado en agosto de 2018.

Téllez, Eric B., Delgado, H., 2011: *Programa para generar mapas probabilísticos de vientos basado en datos de radiosondeo*, Memorias del Congreso Nacional Estudiantil de Investigación, IPN.

Téllez, Eric B., 2015: *3D cylindrical histogram*, MATLAB, Copyright, BSD License. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35555-3d-cylindrical-histogram>

The MathWorks Inc., 2018: *MATLAB Primer*.

The MathWorks Inc., 2018: User community. www.mathworks.com/matlabcentral

USAF, 1986: *USAFETAC CLIMATIC DATABASE, User Handbook*, Enviromental technical Applications Center, Asheville.

Wikipedia, 2018: *Directional statistics*. https://en.wikipedia.org/wiki/Directional_statistics Consultado en agosto de 2018.