



ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

**CARRERA DE INGENIERÍA
GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**“ESTUDIO METODOLÓGICO PARA LA ELABORACIÓN DE
UN MODELO MATEMÁTICO DE VAPOR DE AGUA A PARTIR
DE ESTACIONES DE MONITOREO CONTINUO GPS”**

REALIZADO POR:

ANDREA SALOMÉ VITERI LÓPEZ

SANGOLQUÍ – ECUADOR

MARZO – 2013

CERTIFICACIÓN

Dr. Alfonso Tierra

Ing. Marco Luna

CERTIFICAN QUE:

El proyecto titulado “ESTUDIO METODOLÓGICO PARA LA ELABORACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DE VAPOR DE AGUA A PARTIR DE ESTACIONES DE MONITOREO CONTINUO GPS”, realizado por la señorita ANDREA SALOMÉ VITERI LÓPEZ, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple con las normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército, por lo que nos permitimos acreditarlo y autorizar su entrega al Sr. Ing. Francisco León, en su calidad de Director de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente.

Debido a su importante aplicación se recomienda su publicación

El mencionado trabajo consta de dos documentos empastados y dos discos compactos, los cuales contienen el documento en formato portátil Acrobat (pdf).

Sangolquí, 7 de marzo del 2013

Dr. Alfonso Tierra Criollo
DIRECTOR

Ing. Msc. Marco Luna
CODIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Andrea Salomé Viteri López

DECLARO QUE:

El proyecto de grado titulado “ESTUDIO METODOLÓGICO PARA LA ELABORACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DE VAPOR DE AGUA A PARTIR DE ESTACIONES DE MONITOREO CONTINUO GPS”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 7 de marzo del 2013

Andrea Salomé Viteri López

AUTORIZACIÓN

Yo, Andrea Salomé Viteri López

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación en la Biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado “ESTUDIO METODOLÓGICO PARA LA ELABORACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DE VAPOR DE AGUA A PARTIR DE ESTACIONES DE MONITOREO CONTINUO GPS”, cuyo contenido es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 7 de marzo del 2013

Andrea Salomé Viteri López

RESUMEN

Una de las fuentes de error en el posicionamiento GPS (Global Positioning System) es debido a la troposfera por la presencia de vapor de agua atmosférico; variable que puede ser estimada a partir de las observaciones GPS, después de minimizar los otros errores, y en función de los parámetros de temperatura y presión. Además, el vapor de agua cumple un rol importante en procesos meteorológicos, tanto para estudios climáticos como para estudios hidrológicos.

Por tal motivo, el presente estudio tiene como objetivo principal, el desarrollar una metodología que permita estimar y estudiar el vapor de agua en las estaciones de monitoreo continuo CHPI, CONZ, MDO1, ISPA, OHI2, SCUB y RIOP, pertenecientes a la red SIRGAS – CON mediante un análisis tendencial para los 2 años de estudio.

SUMMARY

One source of error in the GPS (Global Positioning System) positioning is due to the troposphere by the presence of atmospheric water vapor, variable that can be estimated from GPS observations, after the other errors have been minimized, and based on the temperature and pressure parameters. In addition, water vapor plays an important role in climate processes, both for climate studies and for hydrological studies.

For this reason, this study has as its main goal the development of a methodology to estimate and study the water vapor in the continuous monitoring stations CHPI, CONZ, MDO1, ISPA, OHI2, SCUB and RIOP belonging to SIRGAS - CON by trend analysis for the 2-year study.

DEDICATORIA

A Dios por darme fuerza cada día para seguir adelante y no dejarme vencer, y por bendecirme con mi familia y mis amigos y amigas que han sido el soporte y compañía durante todo este tiempo.

A mis padres, Francisco y Myriam, por ser el pilar fundamental de mi vida, por su apoyo incondicional en mis éxitos y derrotas y por haber hecho posible mi sueño de ser ingeniera, por su esfuerzo, por acompañarme desde un inicio en mi vida universitaria y por inculcar en mí los valores, principios y la perseverancia para cumplir mis metas.

A mis hermanos, por acompañarme en mi formación como profesional y por estar siempre presentes con una palabra de aliento.

Y a mis padrinos, Marcelo y Margarita, que son padre y madre, por sus consejos, por alentarme a continuar y por ser mi ejemplo de vida.

Andrea Salomé Viteri López

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por ser mi guía en mis momentos difíciles, por los consejos que no faltaron y que me ayudaron a ser lo que soy, una mujer profesional y con ganas de seguir luchando por superarme; gracias por su bendición y por ser un ejemplo a seguir.

A mis hermanos, Kate y Esteban, porque con pequeñas cosas me ayudaron cuando más los necesitaba; gracias por ser mi inspiración, por ser una grandes líderes en lo que se proponen.

A mis abuelitos y abuelitas, quienes con su palabra y su cariño incondicional estuvieron cada día conmigo para alentarme a continuar, y porque no faltó su bendición.

A toda mi familia, que siempre estuvo pendiente de mi progreso como profesional, a mis primos y primas por aguantar mis días de estrés, gracias por su apoyo y por compartir alegrías y tristezas.

A mis amigas y amigos, por ser parte de mis logros como persona y por haber compartido conmigo los mejores momentos de mi vida; en especial, a una persona que confió en que puedo alcanzar lo que me proponga, que fue mi guía y quien con sus consejos supo levantarme en momentos difíciles, gracias Christian por tu amistad sincera, tu cariño y por estar a mi lado cuando más lo necesite.

A mis profesores, que me inculcaron todo lo que sé hoy, para ser mejor y ver que hay un futuro que debo buscar y por el cual no debo dejar de prepararme.

Y a mis directores de Tesis, al Dr. Alfonso Tierra e Ing. Marco Luna por creer en el proyecto y que podía desarrollarlo, por sus sabios consejos y por inspirarme a seguir investigando y a ser mejor como profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Índice de Tablas

Índice de Figuras

CAPÍTULO I. Aspectos Generales

1.1	Introducción	1
1.2	Antecedentes	1
1.3	Justificación	2
1.4	Descripción del área de estudio	3
1.5	Objetivos	5
1.6	Hipótesis	5
1.7	Metas	5

CAPÍTULO II. Marco Teórico

2.1	Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)	6
2.2	Tropósfera	7
2.2.1	Generalidades	7
2.2.2	Refracción Troposférica	7
2.3	Vapor de Agua Atmosférico	10
2.3.1	Generalidades	10
2.3.2	Observables GPS	11
2.3.3	Cálculo de los Retardos Cenitales	12
2.3.4	Cálculo de Vapor de Agua	13
2.4	Funciones de Mapeo Troposférico	14
2.4.1	Generalidades	14
2.4.2	Función de Mapeo de Lanyi	15
2.4.3	Función de Mapeo de Niell	15
2.4.4	Función de Mapeo de Vienna	18

2.4.5	Función de Mapeo Global (GMF)	18
2.5	Modelos Atmosféricos	19
2.5.1	Generalidades	19
2.5.2	Global Pressure and Temperature (GPT)	19
2.6	Técnicas utilizadas en la medición del contenido de vapor de agua	20
2.6.1	Radiosondas	21
2.6.2	Radiómetros de Vapor de Agua (WVR)	21
2.6.3	Sistema de Posicionamiento Global (GPS)	22
2.6.4	Interferometría de Línea Base muy Larga (VLBI)	22
2.7	Procesamiento de Datos	23
2.7.1	Control de Calidad en TEQC	23
2.7.1.1	Generalidades	23
2.7.1.2	Método	24
2.7.2	Software científico Gamit – Globk	28
2.7.2.1	Generalidades	28
2.7.2.2	Método	28
2.7.3	Módulo Metutil de Gamit	29
2.8	Funciones Piecewise Linear (PWL)	31
2.9	Modelo Matemático de Ajuste	31
2.9.1	Regresión Lineal	33
2.9.2	Prueba de Hipótesis de Durbin – Watson	35

CAPÍTULO III. Metodología

3.1	Estaciones en estudios	37
3.2	Proceso para el cálculo de Vapor de Agua	37
3.3	Procesamiento de los datos	38
3.3.1	Gamit	39
3.3.2	Globk	44
3.3.3	Glorg	45
3.4	Cálculo de Vapor de Agua	45

CAPÍTULO IV. Análisis de Resultados

4.1	Determinación del Vapor de Agua	48
4.2	Comparación entre archivos z-file (modelo atmosférico) y rinex meteorológicos en el cálculo de vapor de agua	48
4.2.1	Comparación de los archivos en la estación de monitoreo continuo CONZ (Concepción – Chile)	49
4.2.2	Comparación de los archivos en la estación de monitoreo continuo ISPA (Easter Island – Chile)	50
4.3	Vapor de Agua Diario	51
4.3.1	Estación de monitoreo continuo CHPI (Cachoeira Paulista – Brasil)	51
4.3.2	Estación de monitoreo continuo CONZ (Concepción – Chile)	53
4.3.3	Estación de monitoreo continuo ISPA (Easter Island – Chile)	54
4.3.4	Estación de monitoreo continuo MDO1 (Fort Davis – Estados Unidos)	55
4.3.5	Estación de monitoreo continuo OHI2 (O’Higgins – Antártida)	56
4.3.6	Estación de monitoreo continuo SCUB (Santiago de Cuba – Cuba)	57
4.3.7	Estación de monitoreo continuo RIOP (Riobamba – Ecuador)	58
4.4	Vapor de Agua Anual	58
4.4.1	Estación de monitoreo continuo CHPI (Cachoeira Paulista – Brasil)	59
4.4.2	Estación de monitoreo continuo CONZ (Concepción – Chile)	62
4.4.3	Estación de monitoreo continuo ISPA (Easter Island – Chile)	63
4.4.4	Estación de monitoreo continuo MDO1 (Fort Davis – Estados Unidos)	64
4.4.5	Estación de monitoreo continuo OHI2 (O’Higgins – Antártida)	66
4.4.6	Estación de monitoreo continuo SCUB (Santiago de Cuba – Cuba)	67
4.4.7	Estación de monitoreo continuo RIOP (Riobamba – Ecuador)	69
4.5	Modelación Matemática	71
4.5.1	Estación de monitoreo continuo CHPI (Cachoeira Paulista – Brasil)	71
4.5.2	Estación de monitoreo continuo CONZ (Concepción – Chile)	73
4.5.3	Estación de monitoreo continuo ISPA (Easter Island – Chile)	75
4.5.4	Estación de monitoreo continuo MDO1 (Fort Davis – Estados Unidos)	75
4.5.5	Estación de monitoreo continuo OHI2 (O’Higgins – Antártida)	78
4.5.6	Estación de monitoreo continuo SCUB (Santiago de Cuba – Cuba)	79
4.5.7	Estación de monitoreo continuo RIOP (Riobamba – Ecuador)	81

4.6	Análisis del Modelamiento Matemático	83
-----	--------------------------------------	----

CAPÍTULO V. Conclusiones y Recomendaciones

5.1	Conclusiones	85
-----	--------------	----

5.2	Recomendaciones	86
-----	-----------------	----

Bibliografía

Anexos

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Parámetros considerados en la ecuación del factor Q	13
Tabla 2.2	Valor de las constantes para la función de mapeo de Niell	17
Tabla 2.3	Valor de las constantes aplicadas en Gamit	30
Tabla 2.4	Ecuación de determinación de variables y error	33
Tabla 2.5	Valores estadísticos de Durbin – Watson	36
Tabla 3.1	Parámetros editados en la tabla Process.defaults	39
Tabla 3.2	Parámetros editados en la tabla sestbl.	40
Tabla 3.3	Parámetros editados en la tabla de Globk	44
Tabla 3.4	Unidades de los parámetro calculado en Gamit	47
Tabla 4.1	Análisis descriptivo de la diferencia entre los RINEX Meteorológicos y Archivos Z	50
Tabla 4.2	Parámetros meteorológicos registrados en el año 2011	82
Tabla 4.3	Prueba de hipótesis para las estaciones de monitoreo continuo	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Mapa Red SIRGAS – CON	4
Figura 2.1	Refracción atmosférica	8
Figura 2.2	Diferencia entre Funciones de Mapeo	15
Figura 2.3	Radiosonda para mediciones del clima en el Ártico	21
Figura 2.4	Esquema de recepción de ondas de VLBI	23
Figura 2.5	Gráfica de seguimiento de los satélites en observación	26
Figura 2.6	Información del receptor y datos de multipath y saltos de ciclo calculados	27
Figura 2.7	Estadístico de Durbin – Watson	36
Figura 3.1	Diagrama para obtener vapor de agua	38
Figura 3.2	Gráficas generadas en el procesamiento para la estación RIOP, día GPS 359 del año 2011	43
Figura 3.3	Archivo resultante del módulo metutil para la estación RIOP, día GPS 2 del año 2011	46
Figura 4.1	Comparación entre RINEX met y Z-File para la estación de monitoreo continuo CONZ, a) año 2010 y b) año 2011	49
Figura 4.2	Comparación entre RINEX met y Z-File para la estación de monitoreo continuo ISPA año 2010	50
Figura 4.3	Vapor de agua estimado durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo CHPI	51
Figura 4.4	Datos de precipitación a las 00h y a las 14h – Septiembre 2010	52
Figura 4.5	Vapor de agua durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo CONZ	53
Figura 4.6	Vapor de agua durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo ISPA	54
Figura 4.7	Vapor de agua durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo MDO1	55
Figura 4.8	Vapor de agua durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la	56

	estación de monitoreo continuo OHI2	
Figura 4.9	Vapor de agua durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo SCUB	57
Figura 4.10	Vapor de agua durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo RIOP	58
Figura 4.11	Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de CHPI	59
Figura 4.12	Mapa ubicación Passa Quatro y Cachoeira Paulista y distancia entre ambas regiones	60
Figura 4.13	Vapor de agua y precipitación registrada en los años 2010 y 2011	61
Figura 4.14	Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de CONZ	62
Figura 4.15	Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de ISPA	63
Figura 4.16	Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de MDO1	65
Figura 4.17	Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de OHI2	67
Figura 4.18	Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de SCUB	68
Figura 4.19	Huracán Irene	69
Figura 4.20	Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de RIOP	70
Figura 4.21	Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de monitoreo continuo CHPI	72
Figura 4.22	Datos de Precipitación Mensual por Satélite – Agosto 2010	72
Figura 4.23	Datos de Precipitación Mensual por Satélite – Enero 2011	73
Figura 4.24	Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de monitoreo continuo CONZ	74
Figura 4.25	Desviación respecto a las precipitaciones normales	75
Figura 4.26	Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de monitoreo continuo ISPA	75
Figura 4.27	Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de	76

	monitoreo continuo MDO1	
Figura 4.28	Tormenta tropical Alex	77
Figura 4.29	Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de monitoreo continuo OHI2	78
Figura 4.30	Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de monitoreo continuo SCUB	79
Figura 4.31	Mapa de Anomalía estandarizada de la temperatura media mensual Diciembre 2010	80
Figura 4.32	Precipitaciones por Huracán Tomas	80
Figura 4.33	Mapa de Anomalía estandarizada de la temperatura media mensual Julio 2010	81
Figura 4.34	Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de monitoreo continuo RIOP	82

GLOSARIO

Ambigüedad: Número de ciclos enteros desconocido de la fase portadora

Altura elipsoidal: Distancia vertical por sobre un elipsoide de referencia para un punto específico.

Azimut: Ángulo medido horizontalmente respecto al norte geográfico

Cambio Climático: Ángulo medido horizontalmente respecto al norte geográfico

Clima: Es el estado medio de los elementos meteorológicos de una localidad considerando un período largo de tiempo.

Efeméride: Tabla de posiciones o ubicaciones de un objeto celeste como una función de tiempo.

Estocástico, Proceso: Se define como un conjunto de variables aleatorias que dependen de una variable determinista (tiempo).

Gradiente de Presión: Diferencia de presión entre dos puntos

Gradiente de Temperatura: La razón del cambio de la temperatura por unidad de distancia, muy comúnmente referido con respecto a la altura.

Humedad: Es el contenido de vapor de agua del aire

Humedad Absoluta: En un sistema de aire húmedo, es la razón de la masa del vapor de agua respecto al volumen total del sistema

Humedad Relativa: Tipo de humedad que se basa en el cociente entre la presión actual del vapor del aire y la saturación de la presión del vapor.

Precipitación: Partículas de agua líquidas o sólidas que caen desde la atmósfera hacia la superficie terrestre

Presión Atmosférica: Es el peso de la masa de aire por cada unidad de superficie.

RINEX: Formato de Cambio Independiente del Receptor (Receiver INdependent Exchange Format). El formato incluye definiciones para tres observables GPS fundamentales: tiempo, fase y distancia.

Saturación: Condición del aire que se presenta cuando la cantidad de vapor de agua que contiene es el máximo posible para la temperatura existente

Semana GPS: Tiempo GPS iniciado a la media noche del Sábado/Domingo 6 de enero de 1980. La semana GPS es el número de semanas completas desde la hora GPS cero.

ACRÓNIMOS Y SIGLAS

ANTEX	Antenna Exchange Format
COMPASS	Chinese Satellite Navigation System
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EOP	Earth Orientation Parameters
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPT	Global Pressure and Temperature
IGS	International GNSS Service
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
INMET	Instituto Nacional de Meteorología – Brasil
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Brasil
INSMET	Instituto de Meteorología de la República de Cuba
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PWL	Piece-Wise Linear
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
SIRGAS	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas
TEQC	Translation, Edition and Quality Check
UNAVCO	University NAVSTAR Consortium
VLBI	Very-Long-Baseline Interferometry
ZTD	Zenith Total Delay
ZWD	Zenith Wet Delay
ZHD	Zenith Hydrostatic Delay

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. INTRODUCCIÓN

El vapor de agua es uno de los componentes climáticos considerado principalmente en procesos meteorológicos o ciclos hidrológicos; contribuye con el balance energético del planeta, sea éste favorable o no, por almacenar calor¹ en una de las capas atmosféricas, conocida como tropósfera.

Una de las problemáticas del contenido de vapor de agua en la atmósfera es por causar un retraso en la velocidad de propagación de la señal GPS, por ende se han propuesto varias metodologías para monitorear el vapor de agua, una de las cuales, es a partir de señales transmitidas por los satélites que por ser sensibles a la presencia de esta componente ayuda al cálculo de su contenido en la atmósfera.

1.2. ANTECEDENTES

A partir del año 1992, el estudio de la atmósfera mediante observaciones GPS se ha venido desarrollando con el objetivo de comprender el comportamiento de la tropósfera y la ionósfera, como principales capas atmosféricas, y poderlas representar por medio de modelos matemáticos. Bevis, Businger, Herring, Rocken, Anthes y Ware², siendo los precursores del estudio atmosférico y quienes aplicaron GPS con el objetivo de tener un monitoreo continuo de predicción meteorológica, influyeron a varios autores a desarrollar metodologías que generen una mejor precisión de predicción del efecto atmosférico.

¹ Córdova, Hildegardo, *Naturaleza y sociedad: Una introducción a la Geografía*, 1, Primera edición, Fondo editorial, Lima 2002

² Bevis, Michael, Businger, Herring, Roken, Anthes & Ware, "GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, Pág. 15,787-15,801, Octubre 1992

Sapucci³, consideró que la mejor aproximación para el efecto troposférico es la suma de las dos componentes de la atmósfera neutra, hidrostática y húmeda, multiplicadas por sus respectivas funciones de mapeo. Las funciones de mapeo que se consideran dentro del cálculo, son modelos matemáticos que relacionan los ángulos de elevación de los satélites con cada componente.

Actualmente, se han desarrollado algunos estudios a nivel regional para obtener vapor de agua mediante GPS, considerándolo como una manera más efectiva y continua, como en Maracaibo, Venezuela para la estación de monitoreo continuo MARA y en Argentina para las estaciones de La Plata y Rio Grande.

1.3.JUSTIFICACIÓN

La cantidad de vapor de agua contenida en la tropósfera, provoca que la señal GPS se retarde al atravesarla, perjudicando la estimación de las coordenadas de la estación, el cual es conocido como refracción troposférica, a su vez considera la parte húmeda y la hidrostática que dependen principalmente de parámetros meteorológicos tales como temperatura, presión y humedad.

Desde un punto de vista ambiental, al vapor de agua se lo considera como causa y consecuencia de las alteraciones del balance energético del planeta, es decir, que a una concentración suficiente tendrá la capacidad de retener la energía térmica emitida desde la superficie, actuando como gas de efecto invernadero. Justificándose así, la necesidad de estimaciones constantes, dadas las implicaciones atmosféricas; y que a su vez, conjuntamente con el cuarto objetivo del Plan Nacional del Buen Vivir, poder enfrentar estratégicamente el calentamiento global.

En nuestro país existen muy pocos estudios sobre la tropósfera y menos aún de una de sus componentes, que en este caso es el vapor de agua. Este limitante presenta la necesidad de determinar el contenido de vapor de agua en la atmósfera continuamente, poder predecirlo y así reducir el error que causa en la propagación de la señal GPS y asimismo, en un futuro poder prever riesgos de inundaciones en zonas vulnerables.

³ Sapucci, Luiz, “Estimativa do vapor d’água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS”, *Universidade Estadual Paulista*, 2001.

1.4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En el desarrollo del proyecto para el cálculo de vapor de agua se emplearon las estaciones de monitoreo continuo que dispongan a la vez de una estación meteorológica, con la finalidad de conseguir datos continuamente de los parámetros troposféricos, entre éstas constan:

- ✓ Cachoeira Paulista – Brasil (CHPI)
- ✓ Concepción – Chile (CONZ)
- ✓ Easter Island o Isla de Pascua – Chile (ISPA)
- ✓ Fort Davis – Estados Unidos (MDO1)
- ✓ O'Higgins – Antártida (OHI2)
- ✓ Santiago de Cuba – Cuba (SCUB)
- ✓ Además de la estación de Riobamba (RIOP), que a pesar de no poseer una estación meteorológica, se la consideró dentro del estudio para determinar el contenido de vapor de agua.

En la figura 1.1 se puede observar la ubicación de las estaciones de monitoreo continuo mencionadas anteriormente, las cuales forman parte de la Red SIRGAS – CON.

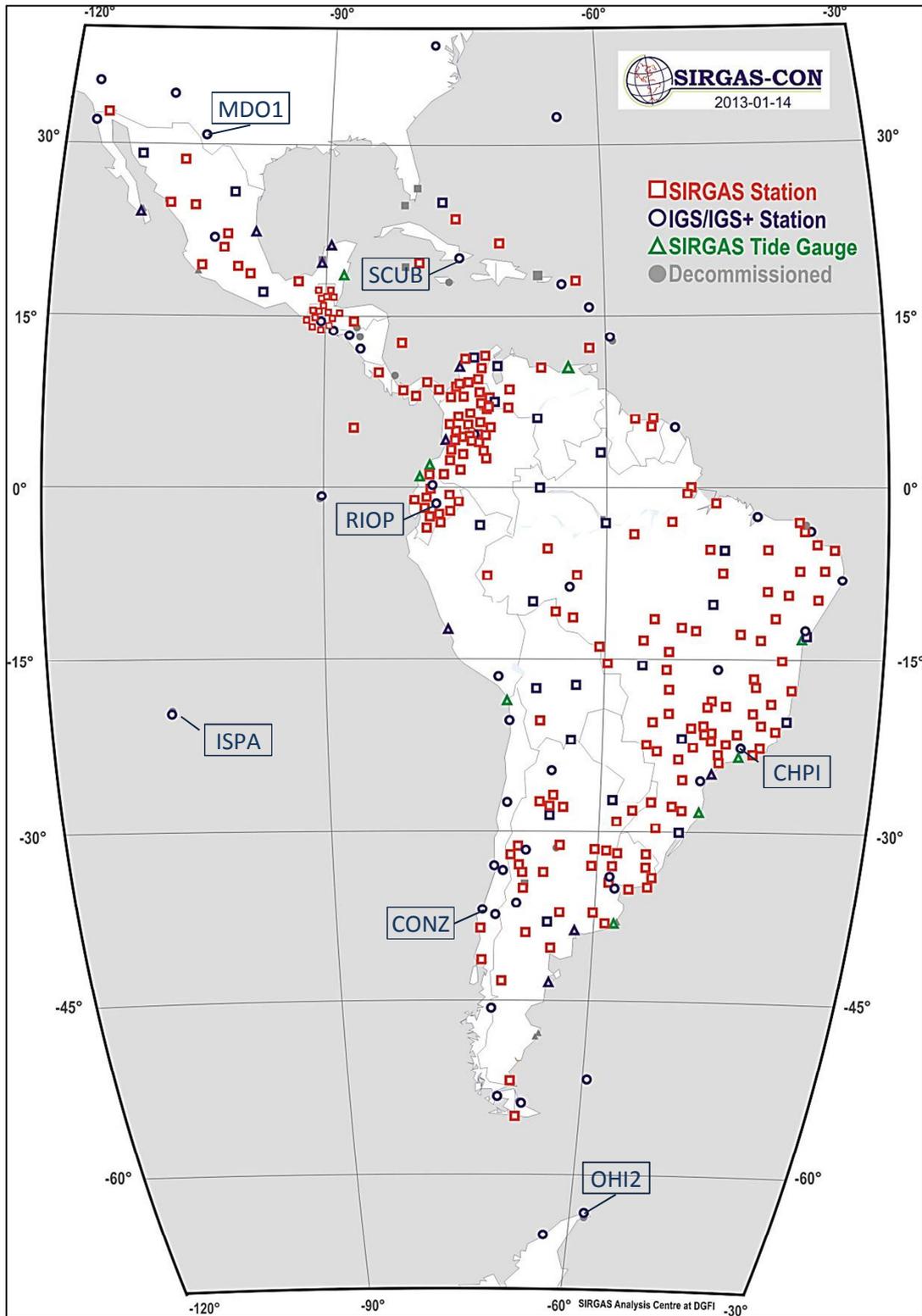


Figura 1.1. Mapa Red SIRGAS – CON
 Fuente: <http://www.sirgas.org/>

1.5.OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Determinar una metodología que permita cuantificar, analizar y predecir el comportamiento del contenido de vapor de agua presente en la atmósfera mediante un modelo matemático para las estaciones de monitoreo continuo.

1.4.2 Objetivos Específicos

- ✓ Estimar el contenido de vapor de agua en las estaciones de Cachoeira – Brasil (CHPI), Concepción – Chile (CONZ), Easter Island – Chile (ISPA), Fort Davis – Estados Unidos (MDO1), O’Higgins – Antártica (OHI2), Santiago de Cuba – Cuba (SCUB) y Riobamba – Ecuador (RIOP).
- ✓ Ajustar los datos resultantes de vapor de agua a un Modelo Matemático para cada estación en estudio.
- ✓ Avalar el modelo matemático mediante técnicas estadísticas

1.6.HIPÓTESIS

La metodología aplicada permite determinar el contenido de vapor de agua para estaciones de monitoreo continuo.

1.7.METAS

- ✓ Proponer una metodología en común para el análisis de vapor de agua a partir del software científico GAMIT – GLOBK.
- ✓ Elaborar una base de datos meteorológicos obtenidos, para las estaciones de monitoreo continuo de CHPI, CONZ, ISPA, MDO1, OHI2, SCUB y RIOP en un mínimo 6 meses.
- ✓ Definir dos modelos matemáticos dependiendo de los resultados de vapor de agua, para comparación e identificación del más acertado.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 SISTEMA GLOBAL DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE (GNSS)

Actualmente, el sistema de navegación por satélite comprende el Sistema estadounidense de Posicionamiento Global (GPS), el sistema ruso GLONASS, el sistema europeo GALILEO y el sistema chino COMPASS. Todos ellos, se caracterizan por determinar la posición de un punto con precisión, mediante satélites como especifica el nombre.

Cada uno de los sistemas de navegación existentes, constan de diferente número de satélites y número de órbitas, las cuales, varían incluso a un diferente ángulo de inclinación. Estos satélites envían el tiempo y posición en las señales sea cual fuese la frecuencia del receptor; sin embargo, existe un limitante para que ésta señal no llegue directamente a la posición real; y puede ser por efectos atmosféricos, por los relojes al no estar sincronizados o por la presencia de objetos que reflejen la señal antes de llegar al punto, como edificaciones.

La aplicación principal de un sistema de navegación global está enfocada en la capacidad para determinar la posición de un punto en cualquier lugar y a cualquier hora de una manera rápida, en la cual se ven implicados los usuarios, los receptores y satélites.

Asimismo, se caracteriza por ser útil para estudiar fenómenos ambientales en diferentes épocas del año, sea un periodo lluvioso o nublado, capaz de proporcionar una cobertura de 24h y de proporcionar un marco en común⁴.

⁴ Awange, Joseph, *Environmental Monitoring Using GNSS: Global Navigation Satellite Systems*, 1, Springer, Londres 2012

Actualmente, el sistema GPS ha demostrado ser relevante a nivel mundial por brindar facilidad al usuario y por las diferentes aplicaciones que se le puede dar, conjuntamente con el sistema GLONASS.

2.2 TROPÓSFERA

2.2.1 Generalidades

La tropósfera es la capa inferior de la atmósfera, que se extiende hasta una altura aproximada de 50km, comprende el 90% de la masa atmosférica bajo los 16km de altura y el 99% bajo los 30km⁵, asimismo es lugar en el cual ocurren todos los procesos meteorológicos, como los vientos o lluvias.

La propagación de la señal GPS en la tropósfera va a depender de la temperatura y vapor de agua, de su variación y la cantidad que ésta presente. La capa troposférica se caracteriza también por ser un medio no dispersivo para las ondas de radio frecuencia.

2.2.2 Refracción Troposférica

El posicionamiento geodésico utilizando GPS, se ve afectado por la presencia de 2 componentes principales de la tropósfera, los cuales en conjunto retardan la señal GPS. La primera es la componente hidrostática, causada principalmente por el nitrógeno y oxígeno y la segunda componente es la húmeda por la influencia del vapor de agua, el cual representa el 10% del total del efecto troposférico.

El efecto que producen en la tropósfera se conoce como Refracción troposférica, el cual retarda a la señal GPS, como muestra la figura 2.1, producida principalmente por la variación del índice de refracción y la presencia de vapor de agua.

⁵ Seeber, Günter, *Satellite geodesy : foundations, methods, and applications*, 2, Walter de Gruyter, Alemania 2003

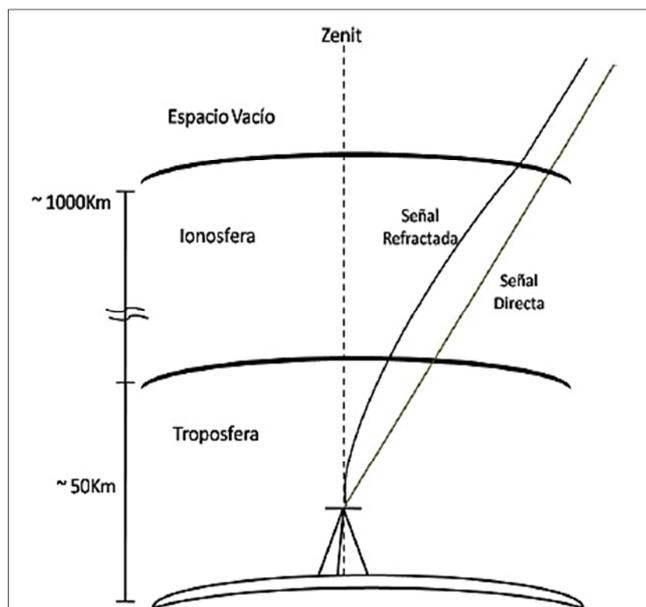


Figura 2.1. Refracción atmosférica

Fuente: Cioce, et al. 2011

Entonces, el retardo de la señal GPS calculado en función del índice de refracción queda expresado, como se muestra en la ecuación 2.1:

$$\Delta\rho = \int [n(s) - 1] ds - (S - G) \quad 2.1$$

En donde,

$n(s)$ índice de refracción en función de una onda s ;

$n(s) = c/v$; c velocidad de propagación de la onda en el vacío y v velocidad de propagación de la onda en la atmósfera.

S trayectoria de la señal (señal refractada)

G longitud geométrica de la señal (señal directa)

A su vez, si se considera trayectorias con un ángulo de elevación mayor a 15° , el término $(S - G)$ es muy pequeño en la tropósfera⁶, quedando la ecuación 2.1 solo en función del índice de refracción, definida como la ecuación 2.2:

$$\Delta\rho_{Trop} = \int [n(s) - 1] ds \quad 2.2$$

⁶ Bevis, Michael, Businger, Herring, Roken, Anthes & Ware, "GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, Pág. 15,787-15,801, Octubre 1992

Al ser $n(s)$ valores próximos a la unidad⁷, es conveniente reemplazarlo por su coindice de refractividad N , a partir de la ecuación 2.3.

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad 2.3$$

Por lo tanto, el retardo de la señal en la tropósfera en función de la ecuación 2.2 y 2.3, se define como la ecuación 2.4:

$$\Delta\rho_{Trop} = 10^{-6} \int N ds \quad 2.4$$

Además, la refractividad puede ser determinada en base a los parámetros meteorológicos tales como temperatura y presión, partiendo de la ecuación 2.5⁸:

$$N = k_1 \frac{P_{dry}}{T} + k_2 \frac{P_v}{T} + k_3 \frac{P_v}{T^2} \quad 2.5$$

En la cual,

P_{dry}	Presión del gas seco, el cual puede ser calculado en función de la presión atmosférica P_{atm} , a partir de la relación: $P_{dry} = P_{atm} - P_v$
P_v	Presión parcial de vapor de agua
T	Temperatura [°K]
k_1, k_2 y k_3	Constantes

Las constantes son calculadas a partir de las ecuaciones desarrolladas por Bevis et al.⁹, obteniendo los siguientes valores:

$$k_1 = 77,609 \pm 0,014 \text{ K mbar}^{-1}$$

$$k_2 = 64,79 \pm 0,08 \text{ K mbar}^{-1}$$

$$k_3 = 3,776 \times 10^5 \pm 400 \text{ K mbar}^{-1}$$

⁷ Sapucci, Luiz, "Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS", *Universidade Estadual Paulista*, 2001.

⁸ Seeber, Günter, *Satellite geodesy: foundations, methods, and applications*, 2, Walter de Gruyter, Alemania 2003

⁹ Bevis, Michael, Businger, Herring, Roken, Anthes & Ware, "GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, Pág. 15,787-15,801, Octubre 1992

El término de refractividad N se divide en dos componentes principales, en hidrostático N_d y en húmedo N_w , y mediante la ecuación 2.5 se define como (ecuación 2.6):

$$N = N_d + N_w = k_1 \frac{P_{atm}}{T} + k_3 \frac{P_v}{T^2} \quad 2.6$$

La refracción troposférica entonces, depende de dos componentes, uno es el retardo cenital hidrostático y el otro es el retardo cenital húmedo, el cual se expresa en la ecuación 2.7, conocido también como ZTD¹⁰.

$$\Delta\rho_{Trop} = ZTD = ZHD \times m(\varepsilon) + ZWD \times m(\varepsilon) \quad 2.7$$

En donde, ZHD y ZWD es el retardo de las componentes hidrostática y húmeda respectivamente, relacionadas cada una con su función de mapeo m , que se detallan en la sección 2.4, para cualquier ángulo de elevación ε .

2.3 VAPOR DE AGUA ATMOSFÉRICO

2.3.1 Generalidades

El vapor de agua es considerado uno de los gases más importantes en cuanto a procesos meteorológicos y climáticos. En la atmósfera cumple la función como regulador de la energía, es decir, que éste dependerá de la humedad y temperatura de la superficie terrestre.

El contenido de vapor de agua varía según la presencia de los parámetros atmosféricos mencionados anteriormente, temperatura y humedad, razón por la cual en zonas extremadamente áridas y lugares de baja temperatura el volumen de vapor de agua es menor llegando a ser cero, comparado a zonas tropicales que puede alcanzar un volumen aproximado del 4%¹¹.

¹⁰ Bevis, Michael, Businger, Herring, Roken, Anthes & Ware, "GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, Pág. 15,787-15,801, Octubre 1992

¹¹ Sapucci, Luiz, "Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS", *Universidade Estadual Paulista*, 2001.

El vapor de agua troposférico puede estar representado de dos maneras: a) como vapor de agua integrado (IWV), es decir, como la masa de agua gaseosa presente por unidad de área, expresada en kg/m^2 , o b) como vapor de agua en unidades milimétricas, definido como la altura de la columna de agua equivalente.

2.3.2 Observables GPS

En el posicionamiento GPS se relacionan dos tipos de observables, los cuales son, mediciones de pseudodistancia y mediciones de fase portadora¹², de los cuales, los observables de fase parte de la diferencia entre la fase de una portadora de la señal recibida desde el satélite al receptor a una frecuencia, φ^S y la fase de una portadora emitida por el receptor φ^R , como se muestra en la ecuación 2.8¹³.

$$\varphi_i = \varphi^S - \varphi^R \quad 2.8$$

Una observación GPS está sometida a ciertos errores que afectan el posicionamiento, y que se pueden minimizar con equipos o modelos matemáticos, los cuales son descritos mediante la ecuación 2.9:

$$\varphi_i = R + c(\delta_r + \delta_s) - I_i + T_r + MP_i + N \quad 2.9$$

En donde,

R	Distancia entre el satélite y la antena
c	Velocidad de la luz
I_i	Refracción ionosférica
T_r	Refracción Troposférica
MP_i	Multipath
δ_r	Error del reloj del receptor
δ_s	Error del reloj del satélite
N	Ambigüedad

¹² Karthigesu Nagarajoo, "Improved Ionospheric Correction for Dual Frequency and Differential GPS Positioning Methods", *The University of Leeds, Department of Electronic and Electrical Engineering*, Octubre 2007, Tesis.

¹³ Seeber, Günter, *Satellite geodesy : foundations, methods, and applications*, 2, Walter de Gruyter, Alemania 2003

El error del reloj satelital, que a pesar de ser muy precisos, están influenciados por el campo gravitatorio y se lo puede corregir mediante el mensaje de navegación enviado a los receptores; el error de multipath, se produce cuando la señal es reflejada en objetos cercanos a la estación antes de llegar al receptor, como edificios, carros o árboles y para minimizar o eliminar el error se usa antenas tipo “choke ring” o simplemente, se ubica a los receptores en lugares que no se obstruya la recepción de la señal GPS.

El retardo ionosférico disminuye la velocidad a medida que el efecto se va incrementando, en el día principalmente¹⁴ y para eliminar el error se emplean equipos de doble frecuencia (L1 L2); y por último, la resolución de ambigüedades por medio de un mayor número de observaciones¹⁵.

2.3.3 Cálculo de los Retardos Cenitales

El cálculo de los retardos cenitales parte de la ecuación 2.9, al minimizar los errores quedando como única incógnita el retardo troposférico T_r , o conocido también como Retardo Cenital Total (ZTD).

Una vez calculado el retardo total (ZTD) se estima el retardo hidrostático (ZHD), el cual es una de las componentes troposféricas, en función de mediciones de presión en la superficie P_s , de la latitud φ y de la altura h mediante modelos numéricos, como el desarrollado por Saastamoinen¹⁶ de acuerdo a la ecuación 2.10:

$$ZHD = (2,276714 \times 10^{-3}) \frac{P_s}{(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00028h)} \quad 2.10$$

El valor obtenido con el modelo para el retardo hidrostático se resta del retardo total (ZTD) para obtener el valor del retardo húmedo (ZWD), el cual posteriormente servirá para el cálculo de vapor de agua.

¹⁴ Leica, *Introducción al Sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global)*, 1, Leica Geosystems AG, Suiza 1999

¹⁵ Huerta, E., Mangiaterra, A. & Noguera, G., *GPS Posicionamiento Satelital*, 1, Universidad Nacional de Rosario, Argentina 2005.

¹⁶ Sapucci, Luiz & Galera Joao, “Avaliação dos modelos de Hopfield e de Saastamoinen para a modelagem do atraso zenital troposférico em território brasileiro utilizando GPS”, *Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas*, Brasil.

2.3.4 Cálculo de Vapor de agua

El vapor de agua atmosférico está altamente relacionado con la parte húmeda del retardo troposférico y puede ser calculado a partir del retardo cenital húmedo (ZWD) en función de un factor de escala Q , tal y como se observa en la ecuación 2.11.

$$PW = Q \times ZWD \quad 2.11$$

Existen varios modelos para calcular este factor Q , uno de ellos propuesto por Emardson y Derks¹⁷, desarrollado a partir de constantes como densidad del agua y/o contante de los gases para vapor de agua y expresado en la ecuación 2.12:

$$Q = \frac{1}{a_0 + a_1(T_s - T) + a_2(T_s - T)^2} \quad 2.12$$

Donde se considera principalmente a la temperatura de la superficie expresado como T_s y demás constantes que se detallan en la Tabla 2.1, los cuales fueron obtenidos usando series de Taylor¹¹.

Tabla 2.1. Parámetros considerados en la ecuación 2.9 del factor Q

No	Parámetro	Valor	Unidad
1	a_0	6,458	m ³ /kg
2	a_1	-1,78 x 10 ⁻²	m ³ /kg
3	a_2	-2,2 x 10 ⁻⁵	m ³ /kg
4	T	283,49	°K

¹⁷ Emardson, T y Derks, Henrico, "On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water vapour in the European atmosphere", *Meteorology Applications*, 7, 61 - 68, 2000.

El factor Q , se puede calcular también a partir de la Temperatura Media (T_m), en función de la temperatura superficial (T_s) o la Humedad relativa (H_R), como se muestra a continuación en las ecuaciones 2.13¹⁸ y 2.14¹⁹:

$$T_m = 70,2 + 0,72T_s \quad 2.13$$

$$T_m = 0,613901T_s + 0,020243H_R + 102,815 \quad 2.14$$

Por lo tanto, la ecuación del factor Q considerando como variable la temperatura media T_m , queda expresada como indica la ecuación 2.15:

$$Q = \frac{10^6}{R_v \left(-\frac{R_d}{R_v} k_1 + k_2 + \frac{k_3}{T_m} \right)} \quad 2.15$$

Donde R_d y R_v son constantes del gas seco y húmedo respectivamente, y k_1 , k_2 y k_3 , son constantes empíricas que describen la refractividad en función de la temperatura, presión parcial de vapor de agua y presión atmosférica y por ende, los valores son los mismos que la ecuación 2.5.

2.4 FUNCIONES DE MAPEO TROPOSFÉRICO

2.4.1 Generalidades

Se han propuesto algunas metodologías para calcular la función de mapeo para cada una de las componentes de la tropósfera, hidrostática y húmeda, y la diferencia entre muchas de ellas es la cantidad de parámetros meteorológicos a ocupar, como la temperatura, la presión atmosférica, la humedad relativa, altura a la tropopausa, y otros parámetros.

Las funciones de mapeo actúan como factor de corrección para el cálculo del retardo troposférico, por ende el retardo producido en la tropósfera aumenta a medida que

¹⁸ Bevis, Michael, Businger, Herring, Roken, Anthes & Ware, "GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, Pág. 15,787-15,801, Octubre 1992

¹⁹ Sapucci, Luiz, Machado, L. & Monico J., "Modelagem da temperatura media troposferica no Brasil para quantificacao do IWV utilizando GPS", *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza 2004.

disminuye el ángulo de elevación del satélite, las funciones de mapeo dependerán directamente del ángulo de elevación.

2.4.2 Función de Mapeo de Lanyi

La función de mapeo de Lanyi, es considerada uno de los más complejos, ocupando tanto parámetros atmosféricos, como latitud, masa molar, el radio de curvatura de la tierra entre otras constantes determinadas.

El modelo demuestra tener un menor error en los datos hasta un mínimo de 6° de ángulo de elevación. En la figura 2.2, se diferencian 5 modelos del modelo calculado por Lanyi (representado por la expresión *NEW*) con respecto al ángulo de elevación, expresado en cm.

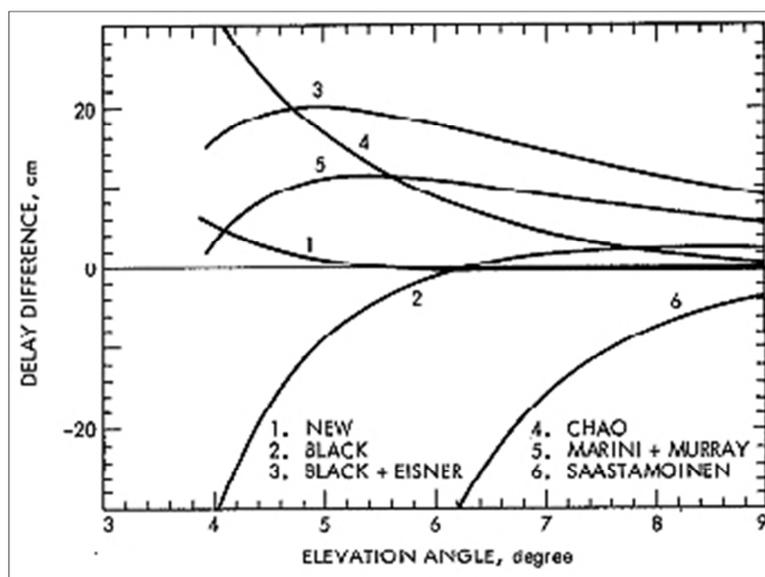


Figura 2.2 Diferencia entre Funciones de Mapeo

Fuente: Lanyi, 1984

2.4.3 Función de mapeo de Niell (NMF)

La función de mapeo desarrollado por Arthur Niell, es frecuentemente utilizada en diferentes estudios meteorológicos por alcanzar un mínimo de 3° en ángulo de elevación; se caracteriza además, por basarse en la ubicación geográfica y en cambios temporales, a

comparación de otros modelos que utilizan como datos principales parámetros meteorológicos de la superficie, como la temperatura.

Sin embargo, para Niell al ocupar datos de temperatura de la superficie no se analizaba la temperatura en toda su magnitud, es decir que no se consideraba el gradiente y la altura de la tropósfera²⁰.

Por ende, para las componentes hidrostática (ecuación 2.17) y húmeda (ecuación 2.16), intervendrían el ángulo de elevación ε y las constantes en función de la latitud, altura ortométrica y época²¹:

$$m_w(\varepsilon) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{1 + \frac{1+c}{a}} \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{b}{\sin \varepsilon + c}} \quad 2.16$$

$$m_h(\varepsilon) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{1 + \frac{1+c}{a}} \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{b}{\sin \varepsilon + c}} + \frac{1}{\sin \varepsilon} - \left[\frac{1 + \frac{aht}{bht}}{1 + \frac{1+cht}{aht}} \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{bht}{\sin \varepsilon + cht}} \right] \quad 2.17$$

Término de corrección de altura

Siendo, m_w la función de mapeo para la componente húmeda y m_h la función de mapeo para la componente hidrostática. Para la ecuación 2.17 de la componente hidrostática, el valor de las constantes a , b y c se calculan a partir de la ecuación 2.18, en función de la latitud ϕ , altura, el día GPS (t) y la fecha de referencia del modelo (DOY), el cual tomará el valor de 28 para el hemisferio norte o 211 para el hemisferio sur, estos valores se consideraron para definir la fase de la función de mapeo:

$$a(\phi, t) = a_{avg}(\phi) + a_{amp}(\phi) \cos\left(\frac{t-DOY}{365,25} 2\pi\right) \quad 2.18$$

²⁰ Sakidin, H., Rizam, M., Mohamed, A., Salmi, M., Matori, N. & Mohamed, A., "Effect of GPS Tropospheric Delay Niell Mapping Function Simplification", *Malaysian Journal of Mathematical Sciences*, 3, 95-107, Malaysia 2009.

²¹ Niell, A., "Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths", *Journal of Geophysical Research*, 101, 1-25, 1996

Donde, a_{avg} y a_{amp} son el valor promedio y el valor de la amplitud obtenidos mediante interpolación desarrolladas por Niell¹⁷. Entonces, el valor de las constantes a , b y c para la componente húmeda e hidrostática correspondiente a las ecuaciones 2.16 y 2.17, resultarían aproximadamente como se describe a continuación en la tabla 2.2 para diferente latitud, a 15°, 30°, 45°, 60° y 75°, los cuales fueron determinados por Niell²².

Tabla 2.2. Valor de las constantes para la función de mapeo de Niell

Función de mapeo	Coeficiente	Latitud ϕ					
		15°	30°	45°	60°	75°	
Húmeda	a	5,80219e-4	5,67948e-4	5,81180e-4	5,97275e-4	6,1642e-4	
	b	1,42753e-3	1,51386e-3	1,45727e-3	1,50074e-3	1,7599e-3	
	c	4,34729e-2	4,67295e-2	4,39089e-2	4,46269e-2	5,4736e-2	
Hidrostática	a_{avg}	1,27699e-3	1,26832e-3	1,24654e-3	1,21961e-3	1,2046e-3	
	b_{avg}	2,91537e-3	2,91523e-3	2,92885e-3	2,90226e-3	2,9025e-3	
	c_{avg}	62,6105e-3	62,8374e-3	63,7218e-3	63,8243e-3	64,258e-3	
	a_{amp}	0,0	1,27096e-5	2,65237e-5	3,40005e-5	4,1202e-5	
	b_{amp}	0,0	2,14149e-5	3,01608e-5	7,25627e-5	11,723e-5	
	c_{amp}	0,0	9,01284e-5	4,34971e-5	84,7954e-5	170,37e-5	
	Coeficiente para el término de corrección de altura						
	a_{ht}	2,53e-5					
	b_{ht}	5,49e-3					
c_{ht}	1,14e-3						

²² Niell, A., "Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths", *Journal of Geophysical Research*, 101, 1-25, 1996

La función de mapeo de Niell ha demostrado ser un modelo capaz de llegar a precisiones cercanas a 5mm^{23} en el cálculo de soluciones finales, en comparación con las funciones de VMF1 y GMF.

2.4.4 Función de mapeo de Vienna (VMF1)

La función de mapeo de Vienna, desarrollada por Johannes Boehm, utiliza datos atmosféricos. Se basa en ecuaciones empíricas para determinar el valor de las constantes, y mejorar la precisión a un ángulo mínimo de 3° y los datos se proporcionan en función de la grilla global ejecutada de $2^\circ \times 2,5^\circ$.

La diferencia entre otras funciones de mapeo, es el cálculo de las constantes b y c , los cuales dependen principalmente del ángulo de elevación, además de la latitud y el tiempo, como se muestra a continuación en las ecuaciones 2.19 y 2.20:

$$b = 0,0029 \quad 2.19$$

$$c = c_0 + \left[\left(\cos \left(\frac{t-DOY}{365} 2\pi + \psi \right) + 1 \right) \frac{c_{11}}{2} + c_{10} \right] (1 - \cos \phi) \quad 2.20$$

Donde, t es el día GPS de observación, DOY la época de referencia del modelo, ϕ la latitud, ψ la constante en función del hemisferio en que se ubique el punto de observación y c_0 , c_{10} y c_{11} coeficientes establecidos por Boehm et al.²⁴

2.4.5 Función de mapeo global (GMF)

Los coeficientes para la función de mapeo global, se obtuvieron a partir de la función de Vienna, para mejorar la precisión a un menor ángulo de elevación de los satélites, en este caso a 3.3° . Se inició, utilizando una grilla global de $15^\circ \times 15^\circ$ dependiente de los parámetros atmosféricos principales, temperatura, humedad y presión.

²³ Pilapanta, Christian & Tierra, Alfonso, "Estudio Metodológico sobre la utilización de Funciones de Mapeo Troposférico en el posicionamiento GPS de alta precisión", VII Congreso Ciencia y Tecnología ESPE 2012, Sangolquí, 2012

²⁴ Boehm, Johannes, Werl, Birgit & Schuh, Harald, "Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data", *Journal of Geophysical Research*, 111, 1-22, 2006.

La función GMF desarrollada por Boehm et al.²⁵, combina las funciones de VMF1 y NMF, descritas anteriormente; motivo por el cual su ecuación 2.21 es similar a la ecuación resuelta por Niell para el cálculo de los coeficientes, al considerar como parámetros al día GPS de observación y la época de referencia t .

$$a = a_0 + A \cos\left(\frac{t-DOY}{365} 2\pi\right) \quad 2.21$$

Siendo, A el valor de la amplitud anual y a_0 el valor medio del modelo.

2.5 MODELOS ATMOSFÉRICOS

2.5.1 Generalidades

Actualmente, existen varios modelos atmosféricos desarrollados con el fin de obtener valores de presión y temperatura para un tiempo de rastreo a falta de valores reales en tiempo real, como el GPT (Global Pressure and Temperature)²⁵, que es el más común de todos o como el modelo MOPS (Minimal Operational Performance Standards for Global Positioning System)²⁶, en el cual, los parámetros meteorológicos se obtuvieron por interpolación.

A partir de estos modelos atmosféricos se obtienen valores aproximados de los parámetros de presión y temperatura, por tal motivo para estudios atmosféricos es necesario considerar que sin ser valores reales los resultados deben analizarse dependiendo a las condiciones climáticas de la región.

2.5.2 Global Pressure and Temperature (GPT)

La determinación del modelo matemático GPT fue desarrollado en base a 3 años de monitoreo, desde 1999 al 2002, mediante medias mensuales tomadas de la red mundial en el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF)²⁵.

²⁵ Boehm, Johannes, Niell, A., Tregoning, P. & Schuh, Harald, "Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data", *Geophysical Research Letters*, 33, 1-4, 2006.

²⁶ Perdiguier, R., Zurutuza, J., Ruiz, M. & Sevilla, M., "Estrategias de cálculo del retardo troposférico y su influencia en procesamiento GPS de alta precisión", 6ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Tomar 2008.

El modelo fue desarrollado a partir la ecuación 2.22 y 2.23, las cuales, fueron generadas por Berg²⁷ en 1948, mediante la interpolación exponencial de mediciones de presión y la interpolación lineal de mediciones de temperatura.

$$P = P_r(1 - 0,0000226(h - h_r))^{5,225} \quad 2.22$$

$$\frac{dT}{dh} = -0,0065 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m} \quad 2.23$$

Donde, los valores de presión P y altura h se reducen a una presión $P_r = 1013,25$ y una altura h_r referente al nivel medio del mar²⁸ formando una grilla global.

Por lo tanto, el modelo GPT depende de los parámetros de presión y temperatura, y además, está en función de la latitud, longitud, altura elipsoidal de la estación y el día GPS²⁹ correspondiente al tiempo de levantamiento de los datos.

2.6 TÉCNICAS UTILIZADAS EN LA MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE VAPOR DE AGUA

Actualmente, se han desarrollado diferentes metodologías y equipos para determinar parámetros meteorológicos en distintos lugares y a horas específicas, ciertos equipos como las estaciones meteorológicas que se caracterizan por su capacidad de enviar datos continuamente facilitan al usuario en la obtención de los valores de presión y temperatura en tiempo real.

La medición de vapor de agua puede ser por radiación, dispersión o absorción y si se lo realiza diariamente es significativo al momento de realizar estudios climáticos para evaluar la variación de su contenido y su presencia en la atmósfera, pero es imprescindible tener en cuenta la precisión de cada uno de los equipos y del alcance del proyecto que se vaya a realizar.

²⁷ Berg, Hellmut, "Allgemeine Meteorologie", *Dümmler Verlag Bonn*, 76, 1-114, Alemania 1948

²⁸ Böhm, Johannes, Heinkelmann, Robert & Schuh, Harald, "A Global Model of Pressure and Temperature for Geodetic Applications", *Journal of Geodesy*, 81, 679-683, 2007

²⁹ Perdiguier, R., Zurutuza, J., Ruiz, M. & Sevilla, M., "Estrategias de cálculo del retardo troposférico y su influencia en procesamiento GPS de alta precisión", 6ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Tomar 2008.

2.6.1 Radiosondas

Las radiosondas son dispositivos que se transportan en balones meteorológicos, son capaces de medir temperatura, humedad relativa y presión a una altura aproximada de 30km, y además se caracteriza por enviar los datos a un receptor en tiempo real.

La precisión de uno de los equipos conocido como “*Vaisala*”, es del 3% en humedad relativa, 0,2°C en temperatura y 0,5hPa en presión; estos datos fueron comprobados por Niell et al.³⁰, demostrando que los sensores que posee el equipo no presenta gran variabilidad. La figura 2.3 es una radiosonda utilizada para el estudio climático de la región Ártica.



Figura 2.3 Radiosonda para mediciones del clima en el Ártico
Fuente: Racette, P. et al, 2000

2.6.2 Radiómetros de Vapor de agua (WVR)

Los radiómetros de vapor de agua miden la componente húmeda (ZWD) por la radiación termal de las moléculas de agua, por lo cual, se fundamenta en la teoría de transferencia radioactiva.

Los datos se generan continuamente, al igual que la técnica anterior, generando perfiles por cada observación; y es utilizada mayormente en estudios para la comprobación de datos GPS.

³⁰ Niell, A., Coster, A., Solheim, F., Mendes, V., Toor, P., Langley, R. & Upham, C., “Comparison of Measurements of Atmospheric Wet Delay by Radiosonde, Water Vapor Radiometer, GPS, and VLBI”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18, 830-850, 2000.

Las mediciones realizadas en radiómetros, tiene un grado de imprecisión con respecto a la instrumentación, a la temperatura, al modelo físico de la atmósfera y a condiciones atmosféricas, de aproximadamente 2mm^{31} del ZWD.

2.6.3 Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El sistema GPS fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos³² con fines militares inicialmente, con el objetivo de definir la posición, velocidad y tiempo de un punto en un sistema de referencia en común.

Los satélites están en 6 planos orbitales, inclinados a 55° con referencia al ecuador. Comprende 3 principales segmentos, el primero de ellos el segmento espacial, en el cual constan los satélites que son los encargados en enviar las señales; el segundo segmento es el de control, encargado los institutos de monitoreo de las estaciones y finalmente el segmento del usuario.

Las señales generadas por los satélites y controladas a su vez por un reloj atómico sufren distorsiones en su paso, especialmente por la atmósfera, hasta los receptores debido a la refracción atmosférica, conocido así al retardo que se da en la señal.

Por ende, es necesario calcular estas distorsiones para minimizar el error en la señal enviada por el satélite. El error troposférico comprende a la componente de vapor de agua y para su cálculo se parte de los ficheros RINEX de observación, útil para evaluar el ZTD y calcular la componente húmeda.

2.6.4 Interferometría de línea Base muy Larga (VLBI)

La técnica VLBI es un método de medición interferométrica de cuerpos celestes por medio de radiotelescopios, los cuales captan las ondas producidas por éstos objetos. Actualmente, varios estudios han determinado variables geodésicas mediante la medición de las ondas, y principalmente a la atmósfera.

³¹ Niell, A., Coster, A., Solheim, F., Mendes, V., Toor, P., Langley, R. & Upham, C., "Comparison of Measurements of Atmospheric Wet Delay by Radiosonde, Water Vapor Radiometer, GPS, and VLBI", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18, 830-850, 2000.

³² Rey, Jorge, *Nociones de Topografía, Geodesia y Cartografía*, Universidad de Extremadura Servicio, 1999.

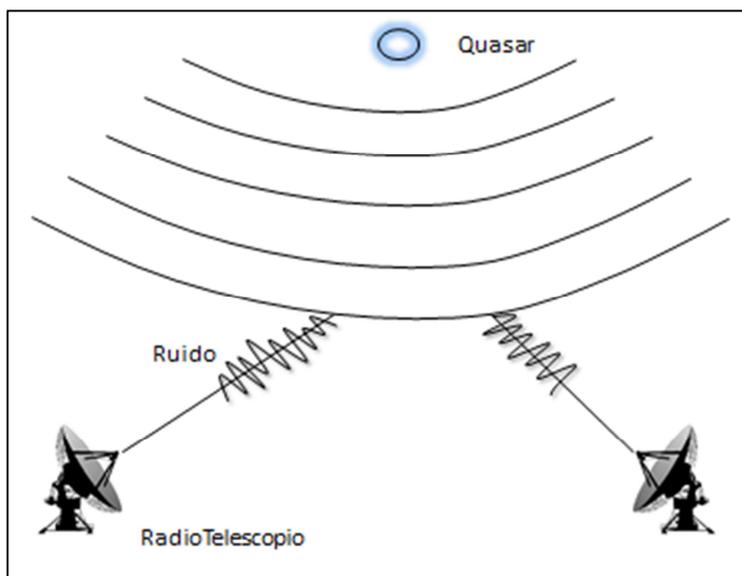


Figura 2.4 Esquema de recepción de ondas de VLBI

Lo que se conoce como ruido en la figura 2.4, está relacionado a la atmósfera por el retardo que produce en la señal por 2 principales efectos: ionósfera y tropósfera por su densidad y por contener al vapor de agua; lo cual permite el cálculo de los parámetros ZTD y ZWD, para posteriormente determinar la cantidad presente de vapor de agua.

En comparación con el sistema GPS, no resulta efectivo por su alto costo en operación, sin embargo ambos métodos muestran concordancia dentro de los límites de error aceptables³³. Aparte que esta técnica no depende del ángulo de elevación y puede establecer un error por el movimiento del mismo.

2.7 PROCESAMIENTO DE DATOS

2.7.1 Control de calidad en TEQC

2.7.1.1 Generalidades

El TEQC es un software desarrollado por UNAVCO con el objetivo de transformar, editar y analizar la calidad de los archivos RINEX, para dar mayor facilidad al usuario en corregir y revisar la información del satélite y receptor.

³³ Toll, Mathew & Tubbs, Robert, "Very Long Baseline Interferometry (VLBI) as a means of sensing water vapour", MetOffice Forecasting Research and Development, 543, Reino Unido.

Al hablar de poder transformar en TEQC, se refiere a cambiar los archivos brutos del receptor al formato universal, conocido como RINEX y a su vez también, convertir estos archivos a la versión 2.11; cabe considerar, que es importante especificar la semana GPS de observación, antes de transformar a RINEX.

Otro de los objetivos de TEQC es el poder editar los archivos RINEX, en diferentes maneras como: a) el encabezado, como tipo de antena del receptor o nombre del encargado; b) configurar el tiempo de observación, es decir, especificar el tiempo inicial y final que se quiere analizar, puede ser en horas, minutos o segundos; c) para unir archivos del receptor en un intervalo de tiempo cualquiera, si se han generado por separado en un día y c) para analizar la información de GPS/GLONASS por separado, si y solo si, una estación rastrea ambos satélites.

Y finalmente, para poder realizar un control de calidad de los datos, el cual, es importante para analizar la información de los satélites, de los relojes, de errores como multipath, efecto ionosférico y saltos de ciclo.

2.7.1.2 Método

El software TEQC para realizar el control de calidad de los archivos RINEX se basa en las ecuaciones 2.24 y 2.25³⁴, tal y como se muestra a continuación:

$$\varphi_i = R + c(\delta_r + \delta_s) - I_i + T_r + MP_{L_i} + \lambda_i N \quad 2.24$$

$$P_i = R + c(\delta_r + \delta_s) + I_i + T + MP_{P_i} \quad 2.25$$

En donde,

- φ_i Observaciones de fase para una frecuencia i
- P_i Pseudodistancia para una frecuencia i
- R Distancia entre el satélite y la antena
- c Velocidad de la luz

³⁴ Estey, Louis & Meertens, Charles, "TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS data", GPS Solutions, 3, 42-49, 1999

δ_r	Error del reloj del receptor
δ_s	Error del reloj del satélite
I_i	Error de la ionósfera para una frecuencia i
T_r	Retardo troposférico
MP_{Li}	Multipath para las portadoras
MP_{Pi}	Multipath para los observables de fase
N	Ambigüedad
λ_i	Longitud de onda ($\lambda_1 = 19,03\text{cm}$ y $\lambda_2 = 24,42\text{cm}$)

A partir de las ecuaciones 2.24 y 2.25, se obtienen las ecuaciones para el cálculo de multipath, al igual que el retardo ionosférico y saltos de ciclo. Por lo tanto, para generar el archivo de calidad de los archivos RINEX, es necesario trabajar en la consola del sistema con el siguiente comando:

```
>> teqc +qc -nav ssssddd0.yyn ssssddd0.yyo
```

Donde,

teqc	Comando propio del software, que siempre va antecedido para cualquier instrucción
+qc	Ordena al software generar el control de calidad de los archivos
-nav	Incluye al archivo RINEX de navegación para el control de calidad
sssddd0.yyn	Archivo RINEX de navegación
sssddd0.yyo	Archivo RINEX de observación
ssss	Nombre de la estación
ddd	Día GPS
yy	Año al cual corresponde

Por ejemplo, para la estación de monitoreo continuo RIOP, día GPS 10 año 2011:

```
>> teqc +qc -nav riop0100.11n riop0100.11o
```



```

*****
QC of RINEX file(s) : riop0100.11o
input RnxNAV file(s) : brdc0100.11n
*****

4-character ID      : RIOP (# = 42006M001)
Receiver type      : TRIMBLE NETRS (# = 4850161924) (fw = 1.2-5)
Antenna type       : TRM41249.00 NONE (# = 60261189)

Time of start of window : 2011 Jan 10 00:00:00.000
Time of end of window   : 2011 Jan 10 23:59:30.000
Time line window length : 23.99 hour(s), ticked every 3.0 hour(s)
  antenna WGS 84 (xyz)  : 1255209.2284 -6253630.0646 -182576.1186 (m)
  antenna WGS 84 (geo)  : S 1 deg 39' 02.32" E 281 deg 20' 57.92"
  antenna WGS 84 (geo)  : -1.650644 deg 281.349422 deg (= -78.650578 deg)
  WGS 84 height         : 2850.2108 m
|qc - header| position  : 68 m
Observation interval    : 30.0000 seconds
Total satellites w/ obs : 31
NAVSTAR GPS SVs w/o OBS : 1
NAVSTAR GPS SVs w/o NAV :
NAVSTAR GPS SVs w/o OBS : 1
NAVSTAR GPS SVs w/o NAV :
Rx tracking capability   : 14 SVs
Poss. # of obs epochs   : 2880
Epochs w/ observations : 2880
Epochs repeated        : 0 (0.00%)
Possible obs > 0.0 deg : 34931
Possible obs > 10.0 deg : 28123
Complete obs > 10.0 deg : 27331
  Deleted obs > 10.0 deg : 338
  Masked obs < 10.0 deg : 965
Obs w/ SV duplication   : 0 (within non-repeated epochs)
Moving average MP1      : 0.438031 m
Moving average MP2      : 0.362033 m
Points in MP moving avg : 50
Mean S1 S2              : 44.55 (sd=4.37 n=27669) 29.83 (sd=7.28 n=27337)
No. of Rx clock offsets : 0
Total Rx clock drift    : 0.000000 ms
Rate of Rx clock drift  : 0.000 ms/hr
Avg time between resets : Inf minute(s)
Freq no. and timecode   : 2 11327 ffffff
Report gap > than       : 10.00 minute(s)
epochs w/ msec clk slip : 0
other msec mp events    : 14 (: 238) (expect ~= 1:50)
IOD signifying a slip   : >400.0 cm/minute
IOD slips < 10.0 deg*  : 45
IOD slips > 10.0 deg   : 54
IOD or MP slips < 10.0* : 55
IOD or MP slips > 10.0 : 63
* or unknown elevation

      first epoch  last epoch  hrs  dt  #expt  #have  %  mp1  mp2  o/slps
SUM 11  1 10 00:00  11  1 10 23:59  24.00  30  28123  27331  97  0.44  0.36  434

```

Figura 2.6 Información del receptor y datos de multipath y satos de ciclo calculados

Inicialmente, en la figura 2.6 se describe la información básica de la estación, así como también el tiempo inicial y final de rastreo y demás especificaciones que se detallan en Viteri et al.³⁵ Finalmente, la última línea describe en resumen las características principales del archivo de calidad como el número de observaciones y en porcentaje el total de recepción de datos; asimismo, multipath y el número de saltos de ciclo respecto a las observaciones.

³⁵ Viteri, Andrea & Tierra, Alfonso, "Control de calidad de archivos RINEX con TEQC", VII Congreso de Ciencia y tecnología ESPE, Sangolquí 2012

2.7.2 Software científico Gamit – Globk

2.7.2.1 Generalidades

El software científico Gamit – Globk fue desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) para determinar el posicionamiento de las estaciones con mejor precisión, las velocidades respecto a cada una de ellas y parámetros atmosféricos.

Los parámetros que utiliza pueden ser generados o adecuados dependiendo de la ubicación de las estaciones y de lo que se busca obtener. Gamit – Globk se ejecuta en el sistema operativo de UNIX, para lo cual es necesaria la instalación de librerías para el uso del paquete del software.

Gamit y Globk realizan funciones distintas pero igual de importantes, GAMIT se caracteriza por analizar los datos GPS con el objetivo de estimar las coordenadas de las estaciones, los parámetros de orientación terrestre (EOPs), parámetros del satélite como centros de fase y el cálculo de líneas base, además del cálculo de parámetros atmosféricos. GLOBK en cambio, combina las soluciones GPS a partir de la matriz de covarianza obtenida en GAMIT, ajusta a un marco de referencia y calcula las velocidades.

2.7.2.2 Método

El procesamiento de los datos con el software Gamit – Globk, requiere la instalación en el sistema operativo basado en UNIX, como puede ser Linux. Una vez instalado el software y con los datos que se desee procesar, es necesaria la configuración de las tablas que se utilizan dentro del procesamiento, las cuales incluyen parámetros y modelos que determinan la precisión de las coordenadas. El programa sigue ciertos pasos para obtener la posición de las estaciones, al ejecutar el comando:

```
>> sh_gamit -expt NAM -s yyyy ddd(inicial) ddd(final)
```

El cual, especifica el nombre del proyecto *NAM*, el año al que corresponde *yyyy* y los días en que comprende el procesamiento, tanto el día inicial *ddd_(inicial)* como el día final *ddd_(final)*.

Al ejecutar el comando la operación interna que realiza GAMIT parte de la preparación de los datos hasta estimar los parámetros por mínimos cuadrados, como se detalla a continuación:

- **MAKEXP y MAKEX** Determina las estaciones que van a ser incluidas para generar el archivo X-File. Este archivo mantiene en un mismo intervalo de tiempo a todos los RINEX de observación a considerar en el procesamiento.
- **FIXDRV** Prepara los archivos de control “*batch*”, el cual genera valores atmosféricos, posición de los satélites y residuales.
- **ARC** Integra las órbitas de los satélites GPS
- **MODEL** Genera el archivo C-File, el cual comprende los residuales de las observaciones y las derivadas parciales referente a los parámetros iniciales.
- **FIXDRV** Corrige saltos de ciclo, elimina outliers y calcula las ambigüedades
- **SOLVE** Estima los parámetros por mínimos cuadrados y genera el archivo de matrices de covarianza (h-file) útil para GLOBK

En Globk se combinan las soluciones obtenidas en Gamit a partir del archivo h-file, y se ajustan a un marco de referencia mediante el módulo de Glog.

2.7.3 Módulo *METUTIL* de Gamit

Gamit posee el módulo *metutil* para estimar parámetros troposféricos, en especial para generar valores de vapor de agua, a partir de mediciones reales o estandarizadas, éste último, en función de un modelo atmosférico.

Para el cálculo de los parámetros troposféricos, se lo puede realizar de 2 diferentes maneras: 1) descargando los RINEX meteorológicos y 2) ocupando los archivos Z-File generado durante el procesamiento en Gamit, el cual tiene por datos a priori la temperatura, presión y humedad relativa. Cualquiera que sea el archivo a ocupar, el algoritmo del cual parte Gamit para el cálculo de las componentes troposféricas es a partir de la ecuación 2.26:

$$ATDEL(\varepsilon) = DRYZEN \times DRYMAP(\varepsilon) + WETZEN \times WETMAP(\varepsilon) \quad 2.26$$

Donde,

<i>ATDEL</i>	Representa el Retardo Zenital Total (ZTD)
<i>DRYZEN</i>	Retardo Zenital Hidrostático (ZHD)
<i>WETZEN</i>	Retardo Zenital Húmedo (ZWD)
<i>DRYMAP</i> y <i>WETMAP</i>	Función de mapeo para cada una de las componentes
ε	Ángulo de elevación

Y finaliza con el cálculo de vapor de agua al ocupar la ecuación 2.27:

$$PW = \frac{10^6}{\delta \times R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k_2' \right)} \times ZWD \quad 2.27$$

Siendo,

δ	la densidad del agua,
R_v	la constante de gas específico de vapor de agua,
k_3 y k_2'	constantes físicas
T_m	la temperatura media de la atmósfera calculado a partir de la ecuación 2.13.

El valor de las constantes utilizadas para la ecuación 2.27 se detalla en la Tabla 2.3³⁶:

Tabla 2.3 Valor de las constantes aplicadas en Gamit

No	Constante	Valor	Unidad
1	Densidad del agua	$\delta_{H_2O} = 1$	g/cm^3
2	Constante de gas específico de vapor de agua R_v / masa molecular del agua	$\frac{R}{M_w} = \frac{8,314}{18,0152}$	$\frac{J K^{-1} mol^{-1}}{kg K mol^{-1}}$

³⁶ Script metutil.f, GAMIT - GLOBK

No	Constante	Valor	Unidad
3	k_2'	22,1	K hPa ⁻¹
4	k_3	3,739*10 ⁵	K ² hPa ⁻¹

2.8 FUNCIONES PIECEWISE LINEAR (PWL)

Las funciones “Piecewise Linear” son funciones lineales que presentan discontinuidades o valores donde un $f(x)$ o su derivada no cambian paulatinamente, es decir, que los segmentos lineales formados por cada función $f(x)$ son de igual tamaño y por ende, son generados a un mismo intervalo³⁷.

La función está definida según Hoşten³⁸, en un espacio vectorial como: (ecuación 2.28)

$$f(x) = \max(c_i'x + d_i) \quad 2.28$$

En donde, c_i representa los vectores pertenecientes a \mathbb{R}^n y $d_i \in \mathbb{R}$.

El uso de estas funciones, principalmente en el Software Gamit, es para representar las variaciones y estimar el retardo cenital atmosférico en un intervalo de tiempo de 2 a 6h durante el día³⁹ y los gradientes atmosféricos. Los valores estimados mediante el PWL se almacenan durante el procesamiento en los archivos O – FILE, para que por medio del módulo *metutil* se extraigan los valores del *ZTD*.

2.9 MODELO MATEMÁTICO DE AJUSTE

Un modelo matemático es el conjunto de parámetros, observaciones y la relación entre ellos para representar y analizar geoméricamente a la realidad y su comportamiento en un futuro, motivo por el cual al buscar un modelo matemático es vital ser conscientes del alcance del estudio y de lo que se quiere predecir.

³⁷ Stuart, Wilson, “Piecewise Linear Function”, <http://mathworld.wolfram.com/PiecewiseLinearFunction.html>, Febrero 2013.

³⁸ Hoşten, Serkan, Piecewise linear objective functions, Departamento de Matemáticas, Universidad de San Francisco, San Francisco 2003

³⁹ Herring, T., King, R. & McClusky S., “GAMIT Reference Manual”, *GPS Analysis at MIT*, Massachusetts 2010

Entre los modelos de predicción se diferencian 2 tipos principales, predicción de una variable y predicción espacial, la diferencia recae en la determinación de un punto o varios puntos en el terreno respectivamente, como ejemplo entre modelos espaciales se encuentra a Mínimos cuadrados colocación, elementos finitos y redes neuronales

El modelamiento de las observaciones comprende un modelo funcional, el cual, relaciona las observaciones con los parámetros y un modelo estocástico⁴⁰ que incluye la esperanza matemática en las variables aleatorias ocupadas.

Por lo tanto, a partir del modelo funcional se consideran las observaciones (L) en función de los parámetros (x), tal y como se mencionó anteriormente, y expresada por la relación siguiente (ecuación 2.29):

$$L = F(x) \quad 2.29$$

Entonces, al ser un modelo matemático dependiente de variables aleatorias, la verificación de las observaciones debe considerar los residuales propios de su medición, a partir de la ecuación 2.30:

$$L_a = L_b + V \quad 2.30$$

Donde,

L_a	Observaciones ajustadas
L_b	Observaciones reales
V	Residuales

En la ecuación 2.30, el vector de residuales se descompone en errores aleatorios de medida y de campo, en la cual el último error se puede considerar como variable de predicción.

⁴⁰ Sevilla M. "Colocación Mínimos Cuadrados", *IV Concurso de Geodesia Superior*, Madrid 1987.

2.9.1 Regresión Lineal

El principio de regresión lineal es el de relacionar las variables entre ellas, desde dos a tantas variables sea posible, definida a partir de la siguiente ecuación 2.31:

$$y = ax + b + \varepsilon \quad 2.31$$

En la cual, a y b son parámetros que representan la pendiente de la recta y el punto donde la recta corta el eje vertical, respectivamente y ε el error aleatorio. Si esta ecuación 2.31 es deducida mediante mínimos cuadrados partiría de la siguiente ecuación 2.32:

$$\sum_{i=1}^m (y - (b + ax_i))^2 = \sum_{i=1}^m (y - b - ax_i)^2 \quad 2.32$$

Donde, por cada valor x_i se tiene 2 valores de y , la cual es la variable estimada en la regresión. Y resolviendo la ecuación anterior se determinan los parámetros además del error en ajuste de la regresión lineal, como se describe en la tabla 2.4⁴¹.

Tabla 2.4 Ecuación de determinación de variables y error

No	Variable	Ecuación
1	Parámetro a (pendiente)	$a = \bar{y} - b\bar{x}$
2	Parámetro b	$b = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$
3	Error en ajuste lineal	$\varepsilon = y_i - y = y_i - b - ax$

Donde, los parámetros son calculados en función de las variables x_i o y_i y sus valores medios, así como para la variable y es \bar{y} .

⁴¹ Hoffman, John, *Linear Regression Analysis: Applications and Assumptions*, 2a, Stata version, Estados Unidos 2010

Coefficiente de Determinación Lineal R^2

Este parámetro relaciona y cuantifica el grado de dependencia o variación entre las variables que intervienen en la regresión, que a partir de las ecuaciones anteriores se determina mediante la ecuación 2.33⁴²:

$$R^2 = \frac{[\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{[\sum(x_i - \bar{x})^2][\sum(y_i - \bar{y})^2]} = \frac{SSR}{SST} \quad 2.33$$

Donde,

SSR Suma de cuadrados de la regresión

SST Suma de cuadrados total

El coeficiente de determinación se define como el cuadrado del coeficiente de correlación, el cual mide la intensidad de relación de las variables que intervienen en la regresión lineal, por lo tanto, mientras éste sea más próximo a 1 será mejor la asociación lineal entre las 2 variables en análisis.

Coefficiente de Autocorrelación

El modelo de regresión lineal en una serie de tiempo, supone que las observaciones no son independientes entre sí, por ende se lo emplea para identificar patrones en una serie de tiempo, como la tendencia o la estacionalidad. El coeficiente se lo determina a partir de la siguiente ecuación 2.34:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (y_t - \bar{y})(y_{t-k} - \bar{y})}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad 2.34$$

Donde,

r_k : coeficiente de autocorrelación

\bar{y} : valor medio de los valores de la serie

⁴² Galbiati, Jorge, "Regresión Lineal Simple", *Apuntes de clase*, Universidad Nacional de Tucumán

y_t : observación en el tiempo t

t_{t-k} : observación en k periodos, dependiendo del orden de la regresión

Al analizar los términos de error en una serie de tiempo, se diferencian dos tipos de autocorrelación, una positiva el cual según⁴³ se refiere a que “si un término de error positivo en el periodo t tiende a producir otro término de error positivo o es seguido por otro término de error positivo $t+k$ y si un término de error negativo en el periodo t tiende a producir otro término de error negativo o es seguido por otro término de error negativo $t+k$ ”, es decir, que existe una autocorrelación positiva si el error en la serie de tiempo sea negativo o positivo es precedido en el tiempo por un error de su mismo tipo. Y por otro lado una autocorrelación negativa, que al contrario de la positiva no está precedido por un mismo tipo de error.

2.9.2 Prueba de Hipótesis de Durbin – Watson

Para analizar la autocorrelación en una serie de tiempo, la prueba de Durbin – Watson, es una de las pruebas estadísticas más utilizadas, el cual determina si existe o no correlación entre cada residuo de las observaciones de la serie. Y se representa mediante la ecuación siguiente 2.35:

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2} \quad 2.35$$

Siendo e_t , los residuos obtenidos en el tiempo t . Los valores poseen un rango que va desde 0 a 4, tal y como se muestra en la tabla 2.5 y en la figura 2.7.

⁴³ Bowerman, Bruce & Oconnell, Richard, *Pronósticos, Series de Tiempo y Regresión: Un enfoque aplicado*, 4ª. Ed, Cengage Learning Brooks Cole, Mexico 2007.

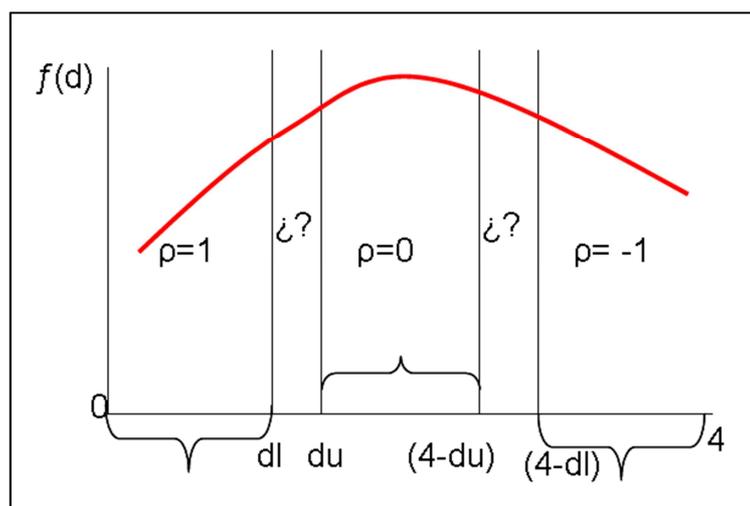


Figura 2.7 Estadístico de Durbin - Watson

Fuente: Ramírez, 2004

Tabla 2.5 Valores estadísticos de Durbin – Watson

No	Límites	Valor de d	Conclusión
1	$0 - d_L$	1	Autocorrelación Positiva
2	$d_L - d_U$	ρ	Ausencia de evidencia
3	$d_U - (4 - d_U)$	0	Ausencia de autocorrelación
4	$(4 - d_U) - (4 - d_L)$	ρ	Ausencia de evidencia
5	$(4 - d_L) - 4$	-1	Autocorrelación Negativa

Fuente: Ramírez, 2004

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 ESTACIONES EN ESTUDIO

Las estaciones que se ocuparon para la determinación del contenido de vapor de agua, son Cachoeira Paulista – Brasil (CHPI), Concepción – Chile (CONZ), Eastern Island/Isla de Pascua – Chile (ISPA), Fort Davis – Estados Unidos (MDO1), O’Higgins – Antártida (OHI2), Santiago de Cuba – Cuba (SCUB) y Riobamba (RIOP), pertenecientes a la Red SIRGAS – CON, de las cuales las 6 primeras están adjuntas a una estación meteorológica.

Para cada una de las estaciones se calculó el valor total de vapor de agua contenido en la atmósfera cada 2 horas al día durante los años 2010 y 2011. Durante este periodo fue vital la recepción de datos reales de presión y temperatura en tiempo real.

3.2 PROCESO PARA EL CÁLCULO DE VAPOR DE AGUA

El cálculo de vapor de agua se desarrolló a partir del software científico Gamit – Globk, el cual se describe en el diagrama siguiente (figura 3.1), donde especifica que inicialmente los archivos GPS, EOPs y SP3, ingresan en el software para el procesamiento de los datos y para generar valores atmosféricos a priori y los retardos cenitales mediante el modelo atmosférico y el modelo matemático PWL, respectivamente. Estos datos se almacenan en los archivos O – FILE y Z – FILE (denominados así por el software).

Posteriormente, para el módulo “metutil” de Gamit es necesario los archivos O – File para extraer el ZTD y los Z – FILE o RINEX meteorológicos para obtener el valor del ZHD, y así poder calcular el valor de vapor de agua para las estaciones.

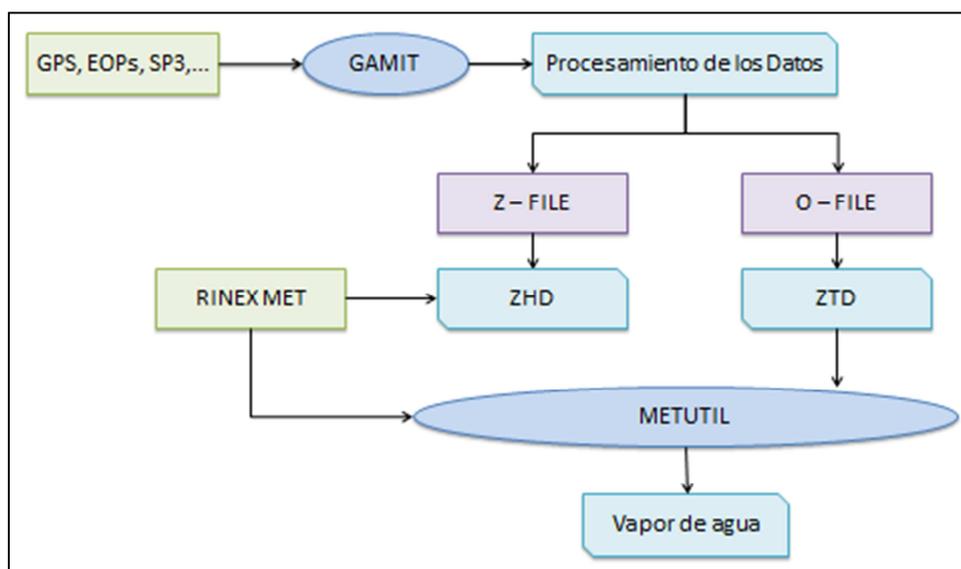


Figura 3.1 Diagrama para obtener vapor de agua

3.3 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

El procesamiento de los datos GPS para las estaciones en estudio se realizó mediante el Software científico GAMIT – GLOBK, el cual a partir de la consola del sistema ejecuta los módulos necesarios para calcular el posicionamiento con alta precisión.

En el desarrollo del procesamiento de los datos, Gamit es el primero en actuar para el ajuste de las observaciones y Globk después combina las soluciones obtenidas y las ajusta a un marco de referencia.

Para obtener los archivos necesarios, Gamit facilita al usuario con la descarga automática de los datos GPS o SP3, o a su vez manualmente antes de realizar el procesamiento, mediante los módulos:

- sh_get_rinex: descarga de los archivos RINEX de observación
- sh_get_nav: descarga de los archivos RINEX de navegación
- sh_get_orbits: descarga de las efemérides precisas o SP3
- sh_get_ion: descarga de los modelos ionosféricos

3.3.1 Gamit

Para ejecutar el módulo Gamit, es necesario especificar algunos de los parámetros que determinarán el alcance del estudio; por ende, previo a un análisis se modificó a 6 tablas, las cuales se describen a continuación:

- **Tabla *process.defaults*:**

Tabla 3.1 Parámetros editados en la tabla Process.defaults

No	Parámetro	Valor
1	set_aprf	SIRGAS_IGS05 (hasta la semana 1632) SIRGAS_IGS08 (desde la semana 1632)
2	set mailto	'andreviteri@gmail.com'

A parte de los parámetros especificados, se puede configurar el intervalo de rastreo, el tiempo final e inicial y el directorio de los datos.

- **Tabla *sites.defaults*:**

Al editar esta tabla se determina las estaciones que van a ser ocupadas en el procesamiento, estas estaciones pueden ser adjuntas a la Red SIRGAS – CON o ser locales.

Las estaciones que se ocuparon en el procesamiento son: BRAZ, CHPI, CONZ, CRO1, GLPS, GOLD, ISPA, LPGS, MANA, MDO1, OHI2, PIE1, RIO2, RIOP, SANT, SCUB, UNAS y VESL, independientemente de las estaciones escogidas para el cálculo de vapor de agua.

- **Tabla *station.info*:**

Especifica la información del tipo de antena y receptor, así como también la altura de las estaciones. Por la magnitud de la información esta tabla debe ser actualizada en función de la tabla *sites.defaults*, en donde ya se determinaron las estaciones que se van a ocupar al procesar los datos, con el comando siguiente:

```
sh_upd_stnfo -l sd
```

En donde, “-l sd” se utiliza para direccionar a la tabla *sites.defaults*.

- **Tabla *sittbl*:**

Se puede editar la información de la estación dando pesos a las coordenadas, a todas o a cada una de las estaciones que intervendrán dentro del procesamiento de datos; como *default* se ha dado en X, Y y Z el valor de 0,05.

- **Tabla *sestbl*:**

Esta tabla es de mayor análisis por especificar parámetros o modelos a considerar dentro del procesamiento. En la tabla 3.2 se muestra algunos de los parámetros o variables configuradas:

Tabla 3.2 Parámetros editados en la tabla *sestbl*.

No	Parámetro	Modelo	Descripción
1	Tipo de experimento	Baseline	No considera los parámetros orbitales
2	Tipo de observable	LC_AUTCLN	Las ambigüedades se resuelven usando la combinación L3
3	Restricción ionosférica	0.0 + 8 ppm	Precisión en el cálculo de ambigüedades WL

No	Parámetro	Modelo	Descripción
4	Retardo cenital	Y (Si)	Estimación del retardo cenital
5	Número de retardos cenitales	13	Número de retardos calculados en el día
6	Intervalo de cálculo para el retardo cenital	2h	Tiempo en horas para calcular el retardo cenital
7	Restricción a-priori cenital	0.50m	Precisión a priori en el cálculo de los retardos cenitales
8	Gradientes atmosféricos	Y (Si)	Estimación de los gradientes atmosféricos
9	Número de gradientes	2	Número de gradientes calculados en el día, N-S y E-W
10	Restricción para el gradiente	0.01	Precisión en el cálculo de los gradientes
11	Modelo Ionosférico	GMAP	Corrección de la refracción ionosférica
12	Modelo atmosférico	GPT50	Valores a priori de presión y temperatura
13	Z-File	Y	Estimación de los valores meteorológicos a priori
14	Función de Mapeo	NMF	Función de mapeo para las componentes hidrostática y húmeda

Fuente: Herring, T., King, R & McClusky, S. 2010

- **Tabla *antmod.dat*:**

La tabla describe los centros de fase para cualquier tipo de antena y se debe actualizar si y solo si, se realizan cambios en cualquiera de ellos; afortunadamente los

desarrolladores de Gamit – Globk facilitan al usuario las tablas en formato *.atx* cuando éstos hayan sido modificados.

Una vez configuradas las variables y/o parámetros en las tablas descritas anteriormente se procede a ejecutar el módulo de Gamit para la semana GPS, mediante el comando:

```
sh_gamit -expt NAM -s yyyy ddd1 ddd2 -pres ELEV
```

Siendo,

NAM	el nombre del proyecto
yyyy	el año de estudio para el procesamiento
ddd ₁	día inicial
ddd ₂	día final
ELEV	para la generación de gráficas en función de la fase y el ángulo de elevación

La figura 3.2 muestra un ejemplo de las gráficas que se generan para la estación RIOP, día 359 del 2011, y a continuación, un ejemplo del comando anterior para la semana 1668.

```
sh_gamit -expt espe -s 2011 359 365 -pres ELEV
```

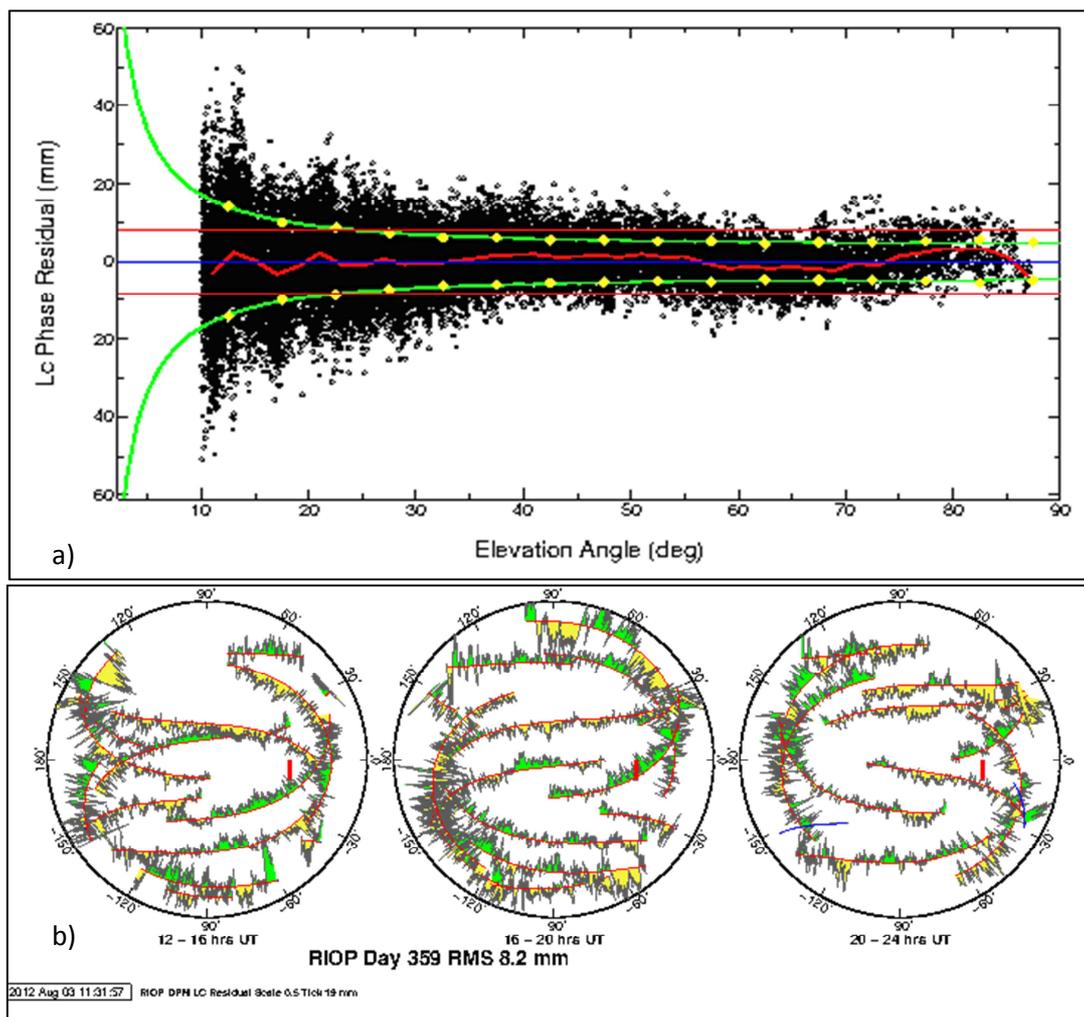


Figura 3.2 Gráficas generadas en el procesamiento para la estación RIOP, día GPS 359 del año 2011

Las gráficas representadas en la figura 3.2, se utilizan para analizar multipath, vapor de agua y el centro de fase de la estación. Entonces, considerando la primera gráfica (a) la línea roja, representa la tendencia de las observaciones, la cual no debe sobrepasar el ruido del centro de fase de antena (línea verde).

La segunda gráfica en cambio (b), representa los residuales; si estos son mayores y se dan a un tiempo determinado, es debido a vapor de agua y si los residuales se repiten en todo el tiempo es multipath.

Existen además otras opciones que se pueden agregar al comando de Gamit como el intervalo de rastreo, número de épocas, tiempo inicial y final de lo que se quiera procesar

con la opción `-sessinfo` o para comprimir y eliminar archivos con las opciones `-copt` y `-dopt` respectivamente, entre otras que se detallan solo con la ejecución de `sh_gamit`.

Finalizado el proceso en Gamit, se generan las carpetas de las soluciones por día, la carpeta “*glbf*” que incluye los archivos *h-file* y “*gifs*”, con las gráficas del procesamiento.

3.3.2 Globk

Al finalizar con el procesamiento diario para las estaciones, se combina las soluciones por semana o los días necesarios para el proyecto antes del ajuste a un marco de referencia, en este caso se combinó semanalmente, siguiendo la siguiente instrucción:

```
sh_glred -expt NAM -s yyyy ddd1 yyyy ddd2 -ncomb 7 -opt H G E
```

En donde,

- expt el nombre del proyecto
- s el tiempo, será entonces yyyy para el año y ddd₁ y ddd₂ para el día inicial y final respectivamente
- ncomb especifica el número de días a combinar
- opt combina h-file (H), indica que se va a ejecutar GLOGR/materialización (G) y se generan las series de tiempo (E)

Previo a la ejecución del comando anterior es necesaria la configuración de la tabla `globk_comb.cmd` especificando variables tal y como se muestra en la tabla 3.3:

Tabla 3.3 Parámetros editados en la tabla de Globk

No	Parámetro	Valor
1	Coordenadas a-priori	IGS05.apr (hasta la semana 1632) IGS08.apr (desde la semana 1632)
2	Valores de rotación terrestre	pmu.usno

3.3.3 Glog

Este programa ajusta a un marco de referencia, el cual se lo define en la tabla *glog_tipo.cmd* y actúa al completarse la acción de Globk, razón por la cual no necesita un comando de ejecución.

Los parámetros configurados se basan en el ajuste al marco, es decir, se especifica el número de parámetros de transformación a ser estimados, los datos a priori y las estaciones para la estabilización del marco.

3.4 CÁLCULO DE VAPOR DE AGUA

Se mencionó inicialmente las estaciones que se considerarían dentro del cálculo de vapor de agua, de las cuales todas ellas son estaciones de monitoreo continuo pertenecientes a la Red SIRGAS-CON.

Las estaciones de CONZ, CHPI, ISPA, MDO1, OHI2 y SCUB por estar adjuntas a estaciones meteorológicas generan información de presión y temperatura en tiempo real, al contrario de la estación de RIOP que al no poseer una estación meteorológica se calculó el contenido de vapor de agua a partir de un modelo atmosférico, previa comparación y análisis de los datos.

En la tabla *sestbl.* de Gamit se configura el modelo atmosférico (Tabla 3.2), en este caso el modelo “GPT50”, que será de utilidad para la generación del archivo Z-FILE. Para las estaciones que posean estaciones meteorológicas se puede descargar los archivos RINEX meteorológicos, ejecutando la siguiente expresión en la consola del sistema:

```
sh_get_met -archive (sopac o cdis) -yr yyyy -doy ddd -ndays # -sites chpi conz ispa  
mdo1 ohi2 scub
```

Como ejemplo para la semana 1668 del 2011:

```
sh_get_met -archive sopac -yr 2011 -doy 359 -ndays 7 -sites chpi conz ispa mdo1 ohi2  
scub
```

Una vez configurados los parámetros y con los archivos meteorológicos se procede a ejecutar el comando “metutil” ocupando los archivos RINEX meteorológicos para las estaciones CONZ, CHPI, ISPA, MDO1, OHI2 y SCUB y los archivos Z – File para la estación de RIOP. A continuación se muestra como ejemplo para la estación de CHPI y RIOP, día 2 del año 2011:

```
sh_metutil -f oespea.002 -m chpi0020.11m
```

```
sh_metutil -f oespea.002 -z zriop1.002
```

Como se describe en los comandos anteriores se utiliza el archivo oespea.002, conocido como el archivo *O-FILE*, por contener los valores estimados de los parámetros en función del modelo PWL, los cuales al ejecutarse el módulo “metutil”, se interpolan para obtener el ZHD.

El archivo resultante tiene de datos el tiempo, representado por “Yr” para el año, “Doy” para el día, “Hr” como hora, “Mn” minutos y “Sec” segundos; además de los parámetros atmosféricos expresados como “Total Zen” para el ZTD, “Wet Zen” para el ZWD, ZHD, “PW” para el Vapor de agua, “Press” para presión, “Temp” para temperatura y los gradientes como “Grad NS” y “Grad EW”, como se muestra en la figura 3.3 y en el Anexo A para la estación de RIOP.

* Estimated atmospheric values for RIOP. Height estimate: 2817.1905 +/- 0.0134 m.													
* METUTIL Version 3.0 2009-08-27													
* Input files: oespea.002 zriop1.002 ZTD-file sigmas scaled by 1.0													
* Yr	Doy	Hr	Mn	Sec	Total Zen	Wet Zen	Sig Zen	PW	Sig PW (mm)	Press (hPa)	Temp (K)	ZHD (mm)	Grad NS
2011	2	0	0	0.	1786.20	142.10	10.40	22.39	1.64	719.50	281.30	1644.10	4.10
2011	2	2	0	0.	1780.20	136.10	5.40	21.45	0.85	719.50	281.30	1644.10	4.95
2011	2	4	0	0.	1780.50	136.40	4.60	21.49	0.72	719.50	281.30	1644.10	5.80
2011	2	6	0	0.	1772.50	128.40	3.90	20.23	0.61	719.50	281.30	1644.10	6.65
2011	2	8	0	0.	1768.60	124.50	4.60	19.62	0.72	719.50	281.30	1644.10	7.50
2011	2	10	0	0.	1771.40	127.30	4.40	20.06	0.69	719.50	281.30	1644.10	8.35
2011	2	12	0	0.	1779.90	135.80	4.20	21.40	0.66	719.50	281.30	1644.10	9.20
2011	2	14	0	0.	1782.20	138.10	4.10	21.76	0.65	719.50	281.30	1644.10	10.05
2011	2	16	0	0.	1771.20	127.10	5.80	20.03	0.91	719.50	281.30	1644.10	10.90
2011	2	18	0	0.	1758.20	114.10	4.20	17.98	0.66	719.50	281.30	1644.10	11.75
2011	2	20	0	0.	1733.00	88.90	4.30	14.01	0.68	719.50	281.30	1644.10	12.60
2011	2	22	0	0.	1764.50	120.40	4.60	18.97	0.72	719.50	281.30	1644.10	13.45
2011	3	0	0	0.	1793.90	149.80	7.30	23.60	1.15	719.50	281.30	1644.10	14.30

Figura 3.3 Archivo resultante del módulo *metutil* para la estación RIOP, día GPS 2 del año 2011

Tal y como se muestra en la figura anterior, los datos son calculados cada 2 horas durante el día 2 de enero del 2011 para la estación de Riobamba, teniendo un total de 13 valores para cada uno de los parámetros atmosféricos.

Las unidades que utiliza Gamit para generar los parámetros atmosféricos mediante el módulo “metutil”, se describen a continuación en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Unidades de los parámetro calculado en Gamit

No	Parámetro	Unidad
1	ZTD, ZWD, PW, ZHD	Milímetro
2	Presión	hPa
3	Temperatura	°K
4	Gradientes	metros

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 DETERMINACIÓN DEL VAPOR DE AGUA

Al finalizar el procesamiento de los datos, fue posible calcular el contenido de vapor de agua para cada estación de monitoreo continuo, considerando por un lado a la información del archivo RINEX meteorológico y por otro, los datos de los parámetros calculados mediante el modelo atmosférico.

Por lo tanto, con la herramienta “metutil” del software científico Gamit – Globk, se obtuvieron los datos de vapor de agua cada 2 horas por día para las estaciones de CHPI, CONZ, ISPA, MDO1, OHI2, SCUB y RIOP, durante los años 2010 y 2011.

4.2 COMPARACIÓN ENTRE ARCHIVOS Z-FILE (MODELO ATMOSFÉRICO) Y RINEX METEOROLÓGICO EN EL CÁLCULO DE VAPOR DE AGUA

Previo al cálculo de vapor de agua para la estación de monitoreo continuo RIOP, se realizó la comparación de los archivos RINEX meteorológicos con los archivos generados por Gamit “Z-File”, el cual contiene datos a-priori de temperatura, presión, humedad relativa y retardos cenitales, con el objetivo de comprobar la proximidad a la realidad de los archivos *Z-File*.

Por lo tanto, se calculó la cantidad de vapor de agua diariamente para las estaciones de monitoreo continuo ISPA y CONZ, considerando como primero a los datos GPS y segundo a los datos del archivo Z – File en función del modelo atmosférico GPT (ver sección 2.6.2).

4.2.1 Comparación de los archivos en la estación de monitoreo continuo CONZ (Concepción – Chile)

La figura 4.1, muestra la relación entre los archivos Z-File y los RINEX meteorológicos en el cálculo de vapor de agua, tanto para el año 2010 (Figura 4.1a) como para el año 2011 (Figura 4.1b). En ambas gráficas por lo tanto, se representa la cantidad de vapor de agua calculado con ambos archivos.

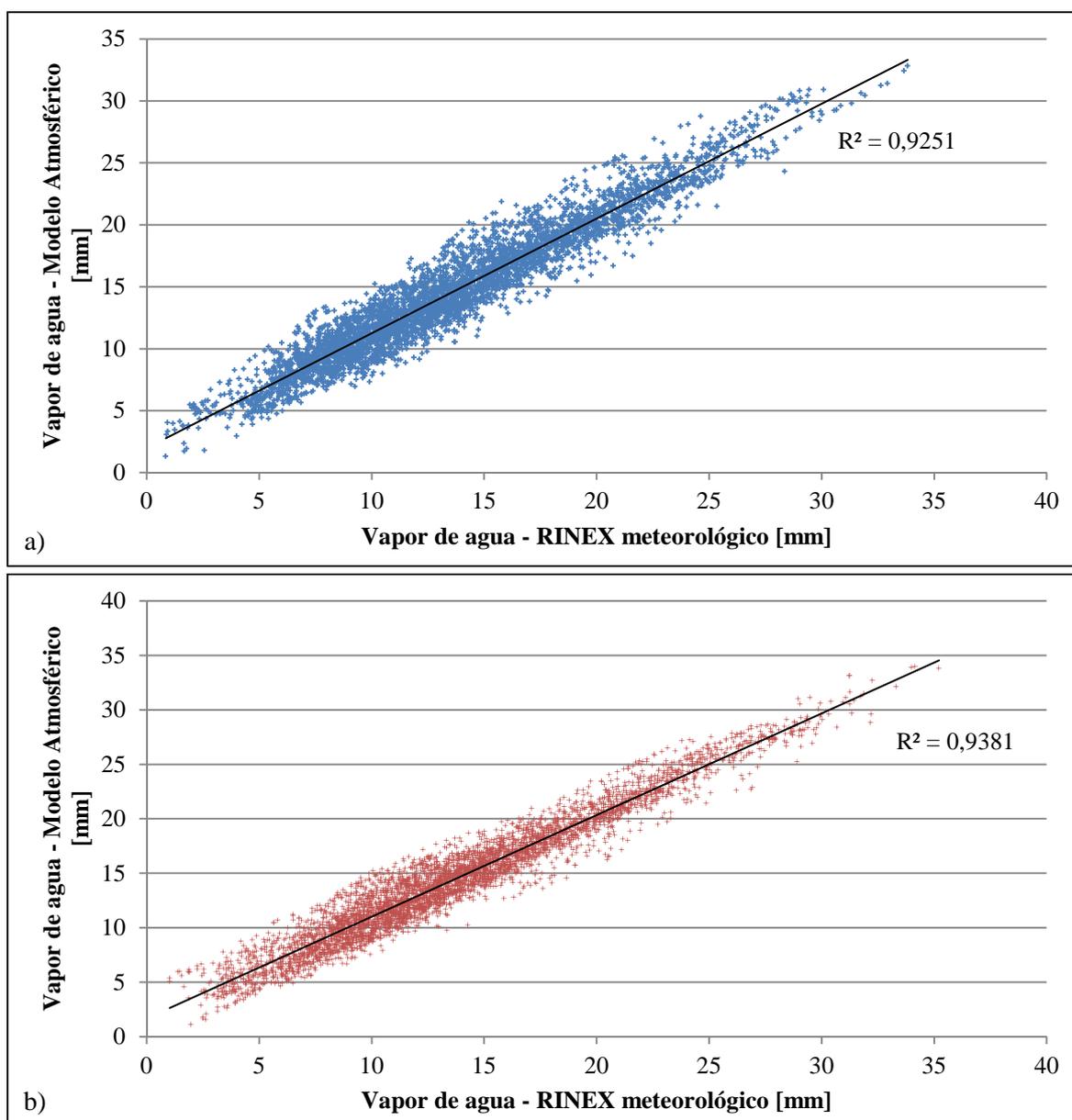


Figura 4.1 Comparación entre RINEX met y Z-File para la estación de monitoreo continuo CONZ, a) año 2010 y b) año 2011

La relación entre ambos archivos es de un 92% y 94%, según el coeficiente de correlación calculado en los años 2010 y 2011 respectivamente; por ende, se mantiene una buena asociación lineal, con una diferencia mínima de 0,01mm y una máxima de 6,1mm en el 2010 y en el 2011 una diferencia máxima de 5,19mm y mínima de 4,2mm, a una desviación estándar de 1,5mm. (Estos datos se pueden evidenciar en el Anexo C)

4.2.2 Comparación de los archivos en la estación de monitoreo continuo ISPA (Easter Island/Isla de Pascua – Chile)

De igual manera para la estación de ISPA se comparó ambos archivos, después del cálculo de vapor de agua en el año 2010; donde la relación entre los archivos RINEX MET y Z – File, se mantiene en un 95,35% de confianza, tal y como se muestra en la figura 4.2, por tanto los residuos obtenidos respecto uno de otro son mínimos, como se muestra en la tabla 4.1.

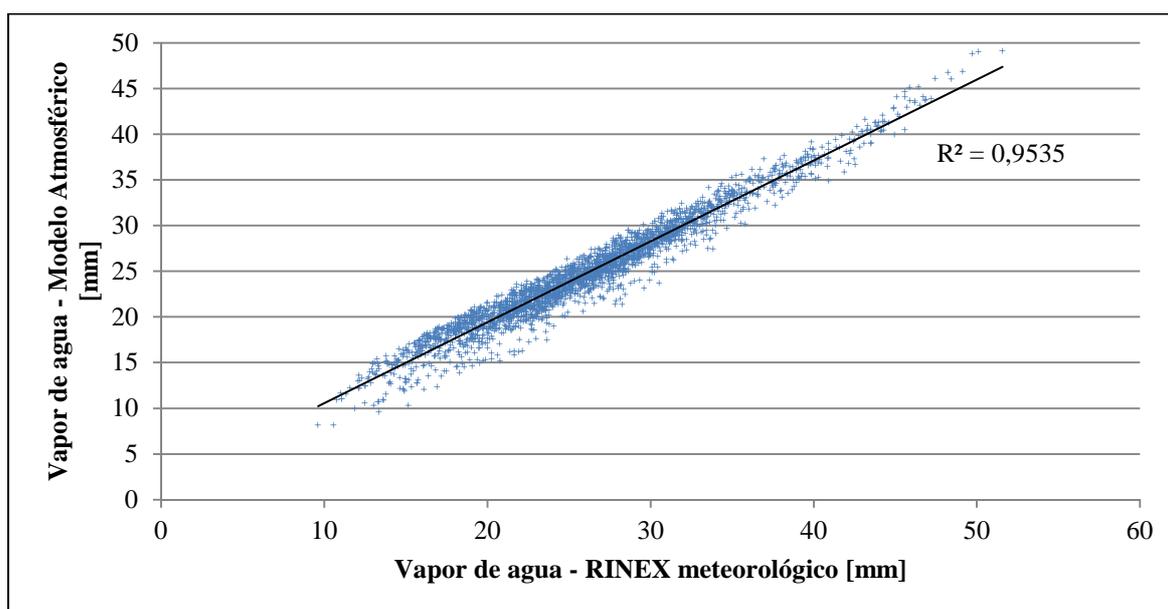


Figura 4.2 Comparación entre RINEX met y Z-File para la estación de monitoreo continuo ISPA año 2010

Tabla 4.1 Análisis descriptivo de la diferencia entre los RINEX Meteorológicos y Archivos Z

No	Estación	Mínimo [mm]	Máximo [mm]	σ	\bar{x}
1	ISPA	0,01	6,88	1,48	1,31

4.3 VAPOR DE AGUA DIARIO

Como se mencionó en un inicio, la cantidad de vapor de agua para las estaciones de monitoreo continuo de CHPI, CONZ, ISPA, MDO1, OHI2, SCUB y RIOP se calculó cada 2 horas por día para los años 2010 y 2011.

A modo de ejemplo, las gráficas siguientes a partir de la sección 4.3.1 a 4.3.7 muestran el día 254 (septiembre 11) para cada estación y cuyos datos se detallan en el Anexo D.

4.3.1 Estación de monitoreo continuo CHPI (Cachoeira Paulista – Brasil)

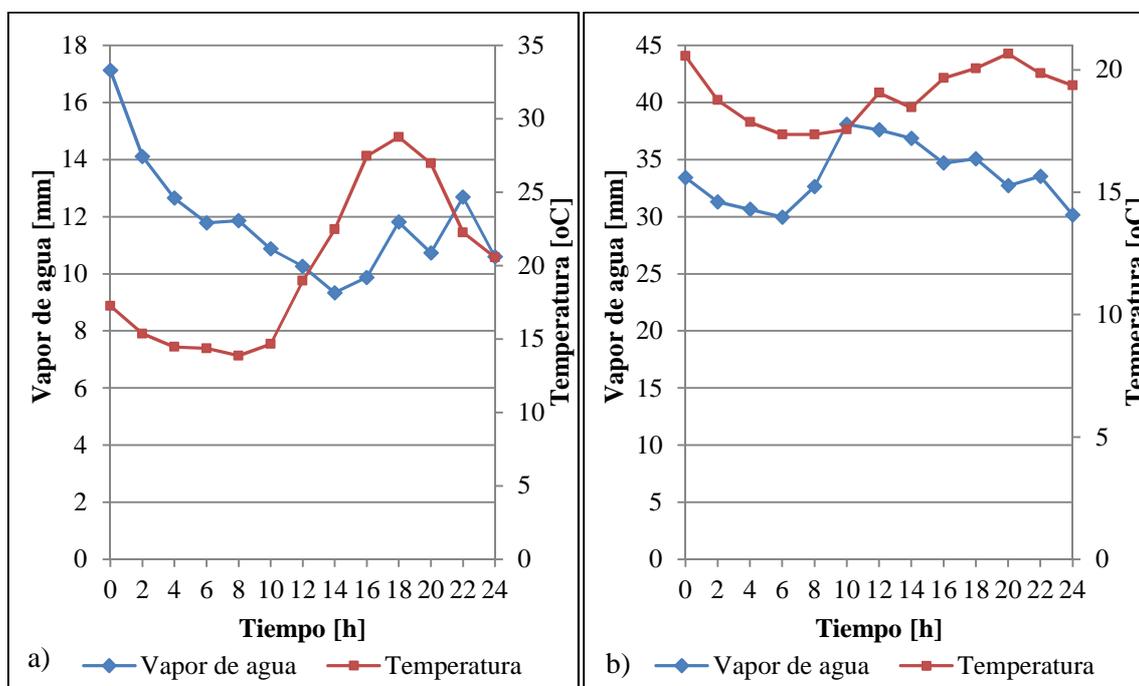


Figura 4.3 Vapor de agua estimado durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo CHPI

La diferencia entre a) y b) de la figura 4.3 se da en la cantidad de vapor existente para un mismo día en diferente año, las cuales demuestran una alta variabilidad para la estación con una desviación estándar de 4mm y una media aritmética de -20,86mm. Los valores máximos estimados son en a) de $17,13 \pm 1,06$ mm a la madrugada y en b) un máximo de $38,10 \pm 0,66$ mm a las 10h a una temperatura de 18°C.

Conforme disminuye la cantidad de vapor de agua (Figura 4.3a), disminuye la temperatura hasta un mínimo de 13,8°C, donde inicialmente tuvo una concentración de 17,13mm y desciende al finalizar el día con una media de 11mm de vapor de agua. Sin embargo, debido a que la concentración de vapor disminuye hasta las 14h no se presencia precipitaciones como se muestra en la Figura 4.4.

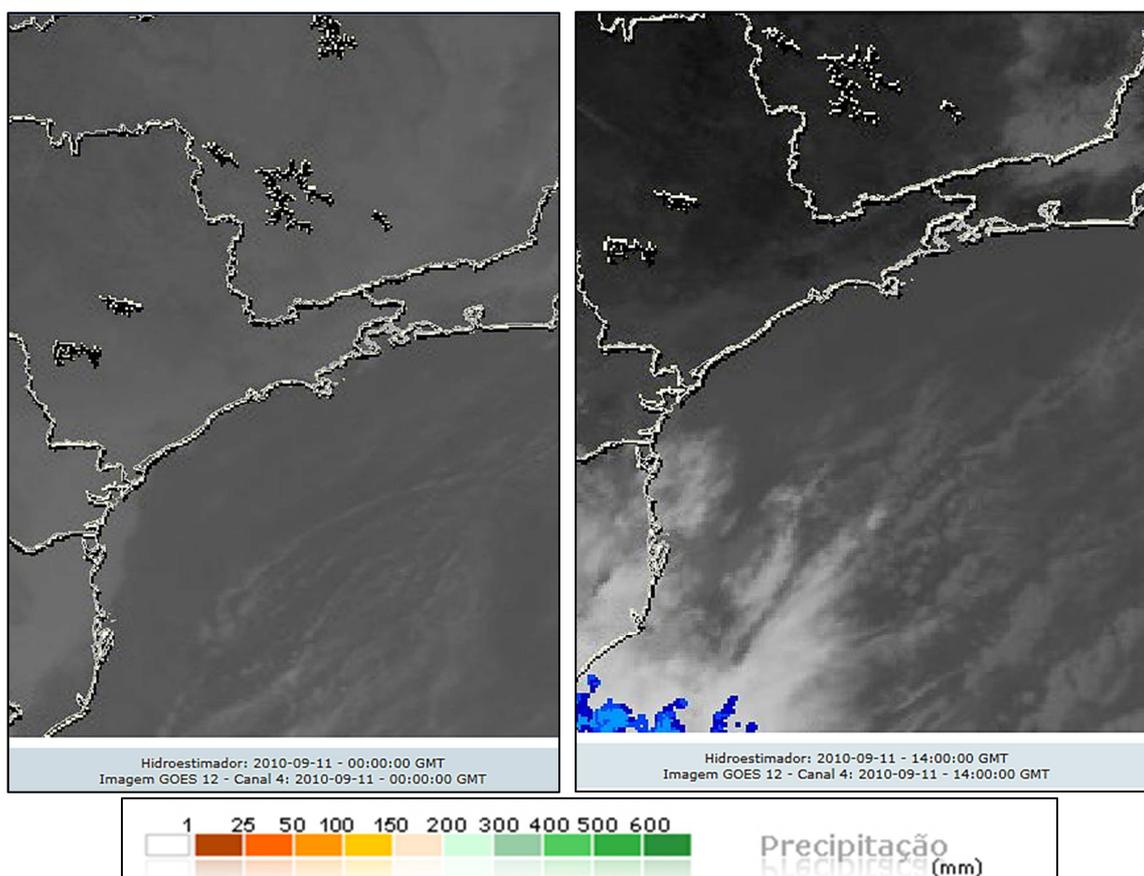


Figura 4.4 Datos de Precipitación a las 00h y a las 14h – Septiembre 2010

Fuente: División de Satélite y Sistemas Ambientales. CEPTEC. INPE. Brasil

Aun así la cantidad de vapor de agua para la estación de CHPI en el 2010 se diferencia del 2011 con un máximo de aproximadamente 27,5mm (Anexo D).

4.3.2 Estación de monitoreo continuo CONZ (Concepción – Chile)

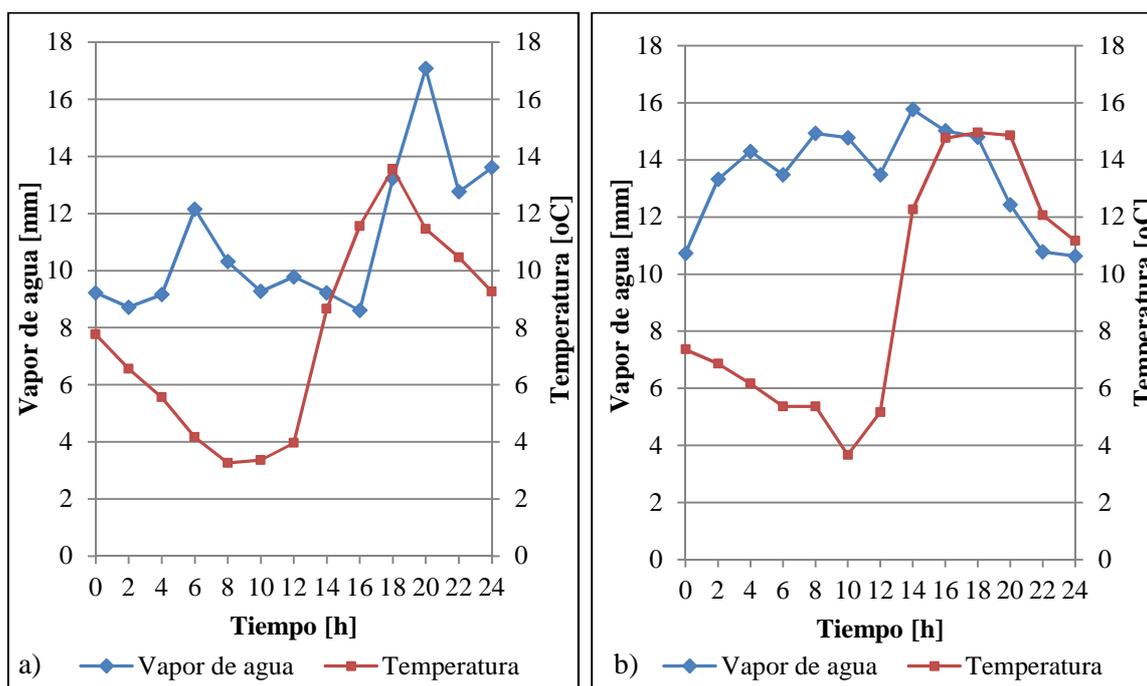


Figura 4.5 Vapor de agua estimado durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo CONZ

En la estación chilena de monitoreo continuo CONZ el clima se caracteriza por ser templado con una variación entre los 8mm y 16mm aproximadamente, por ende la concentración de vapor de agua no es muy diferenciada, puesto que el valor más alto presentado en el día a) y b) es aproximadamente $17,08 \pm 0,62$ mm y $15,77 \pm 0,59$ mm, respectivamente y la mínima en a) $8,6 \pm 0,52$ mm y en b) $10,6 \pm 1,08$ mm.

Asimismo, la media obtenida de vapor de agua para el año 2010 es de 11,78mm y para el año 2011 de 13,48mm registrados a temperaturas bajas, aproximadamente 13° C y 15° C para los años 2010 (Figura 4.5a) y 2011 (Figura 4.5b).

4.3.3 Estación de monitoreo continuo ISPA (Easter Island – Chile)

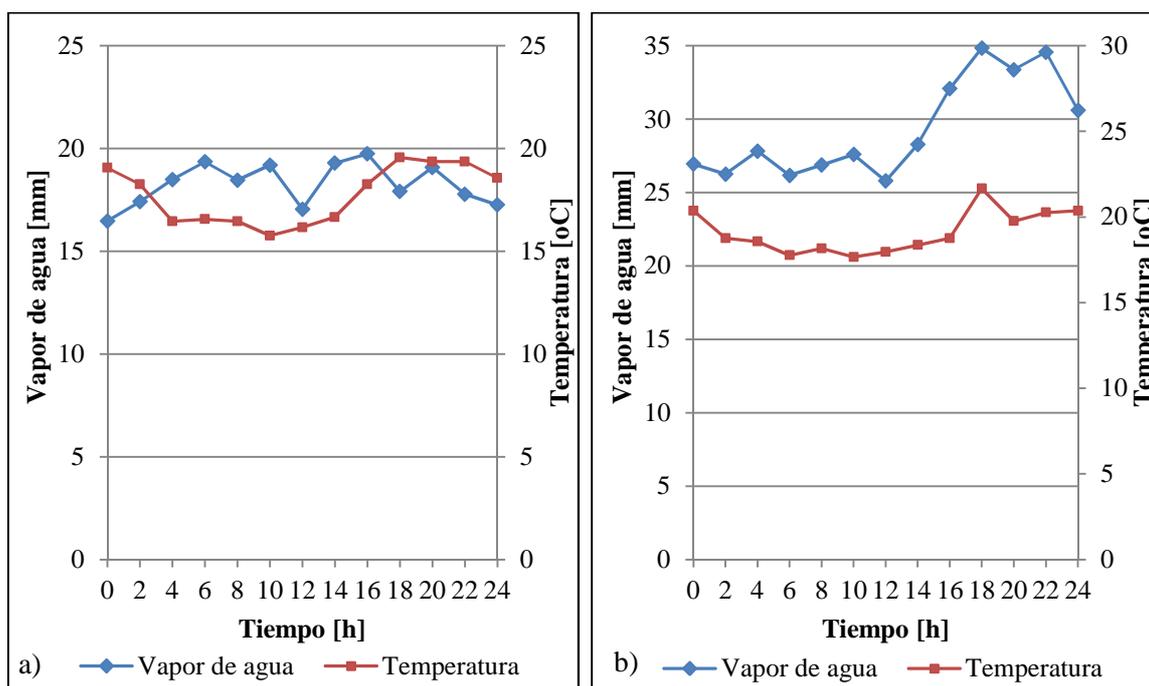


Figura 4.6 Vapor de agua estimado durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo ISPA

La cantidad de vapor de agua concentrada en la estación de monitoreo continuo ISPA se diferencia mayormente a partir del mediodía con valores máximos registrados en a) de $19,74 \pm 0,71$ mm y en b) de $34,8 \pm 0,91$ mm y mínimos de $17,05 \pm 0,68$ mm para el año 2010 y $25,79 \pm 1,05$ mm para el 2011.

En general, los valores máximos y mínimos para el día se mantienen para la figura 4.5b, al contrario de la figura 4.6a que el valor mínimo de vapor de agua registrado se presenta en horas de la madrugada, con un valor equivalente a 16,47mm.

4.3.4 Estación de monitoreo continuo MDO1 (Fort Davis – Estados Unidos)

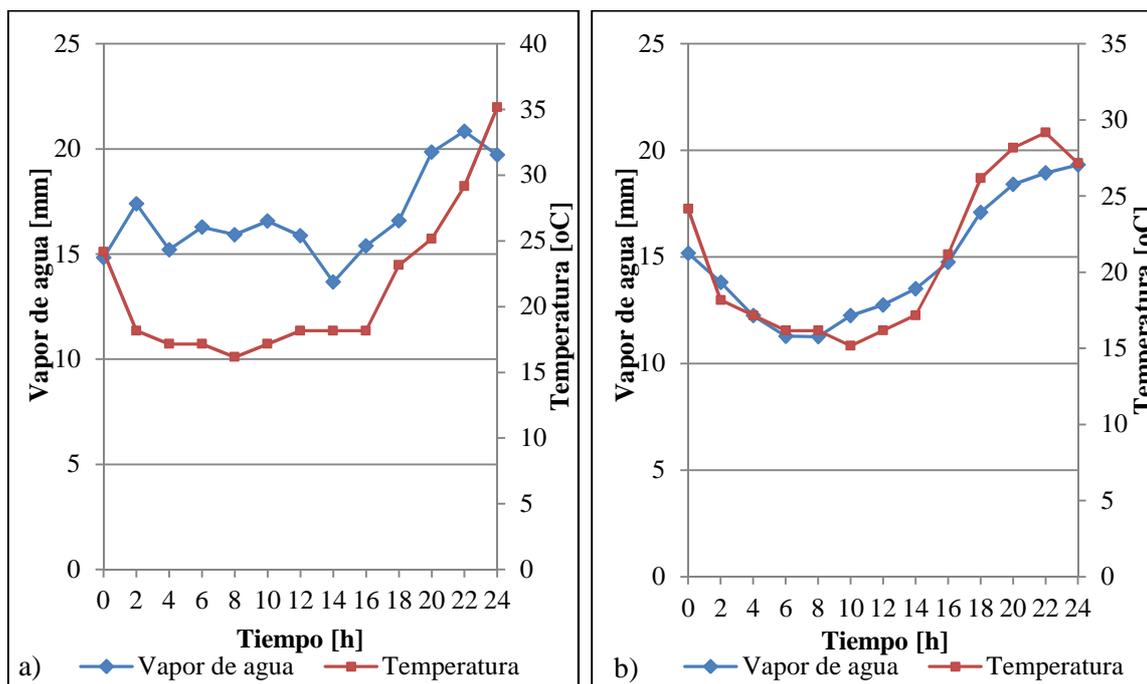


Figura 4.7 Vapor de agua estimado durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo MDO1

A comparación de la estación de monitoreo continuo anterior ISPA, MDO1 no presenta gran diferencia en ambos años, siendo la mínima cantidad de vapor registrada de $11,26 \pm 0,74$ mm en el 2011 (Figura 4.7b) y la máxima de $20,84 \pm 1,12$ mm en el 2010 (Figura 4.7a).

La media de vapor de agua obtenida en el día tanto para el año 2010 como para el 2011 es de 16,28mm y 13,81mm, respectivamente; valores que son influenciados en este caso, por el incremento de la temperatura a partir de las 18h del día 254.

4.3.5 Estación de monitoreo continuo OHI2 (O'Higgins – Antártida)

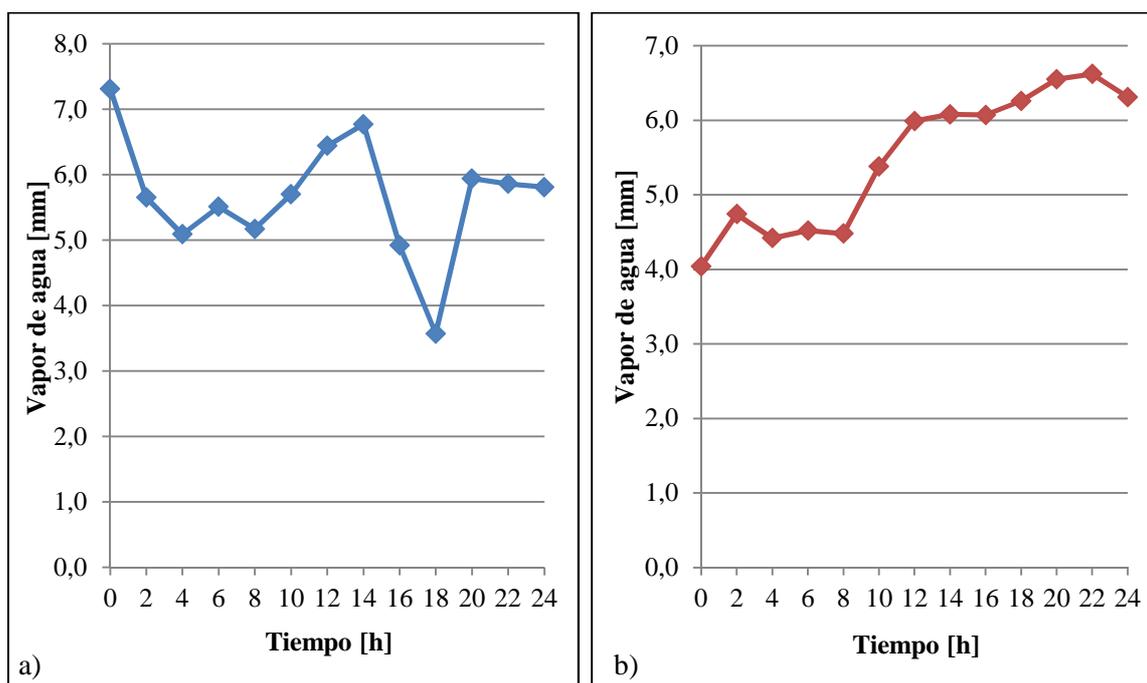


Figura 4.8 Vapor de agua estimado durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo OHI2

Los resultados obtenidos del día 254 a diferentes años para la estación de monitoreo continuo OHI2, no sobrepasan los 8mm ni son menores a los 3mm de vapor de agua contenida en la atmósfera. Por lo tanto, los valores máximos registrados en el 2010 y 2011 son de $7,31 \pm 0,74\text{mm}$ y $6,62 \pm 0,43\text{mm}$ (Figura 4.8).

Por estar en la época invernal, los valores de vapor de agua son mínimos comparados con meses posteriores, llegando a registrar $3,57\text{mm}$ como valor mínimo en el año 2010 y $4,04\text{mm}$ en el 2011.

4.3.6 Estación de monitoreo continuo SCUB (Santiago de Cuba – Cuba)

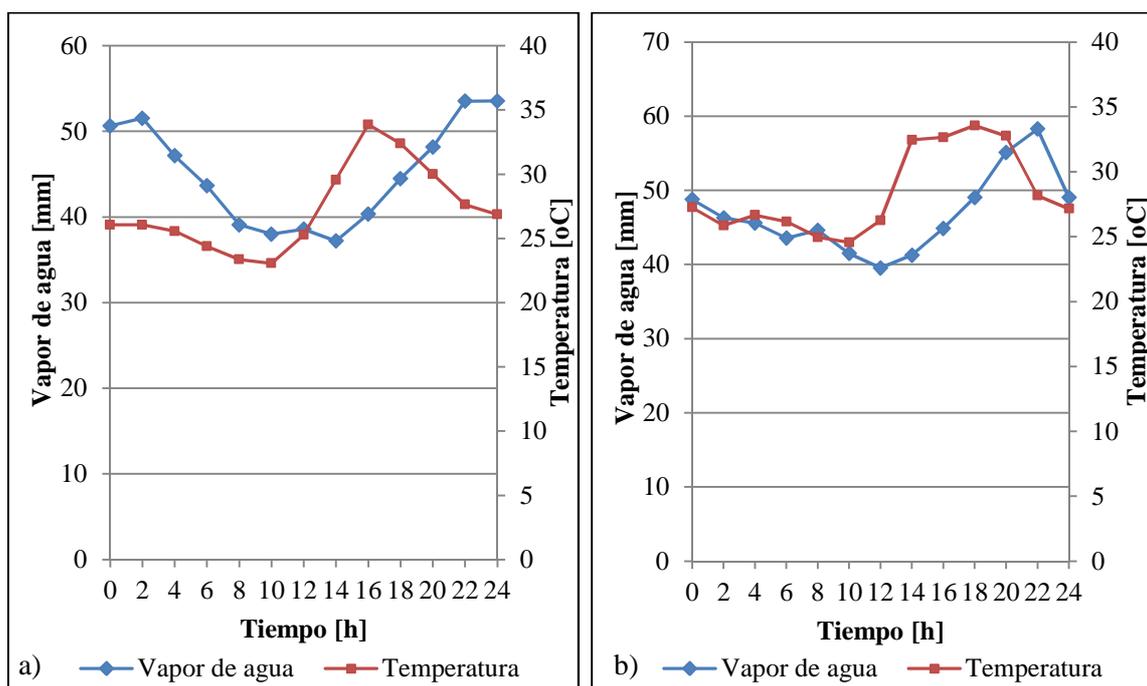


Figura 4.9 Vapor de agua estimado durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo SCUB

La cantidad de vapor de agua presentada durante el día 254 en la estación de monitoreo continuo SCUB no registra cambios bruscos al comparar ambos años, ya que se mantienen con una media de 44,49mm para el año 2010 y 45,58mm para el año 2011.

Sin embargo, los valores máximos y mínimos registrados son distintos en cada año, en el 2010 entonces, se tiene un máximo de $53,55 \pm 1,19$ mm y un mínimo de $37,2 \pm 1,02$ mm, al contrario del 2011, con un máximo de $58,28 \pm 1,14$ mm y un valor mínimo igual a $39,54 \pm 0,96$ mm registrado al mediodía. (Figura 4.9)

4.3.7 Estación de monitoreo continuo RIOP (Riobamba – Ecuador)

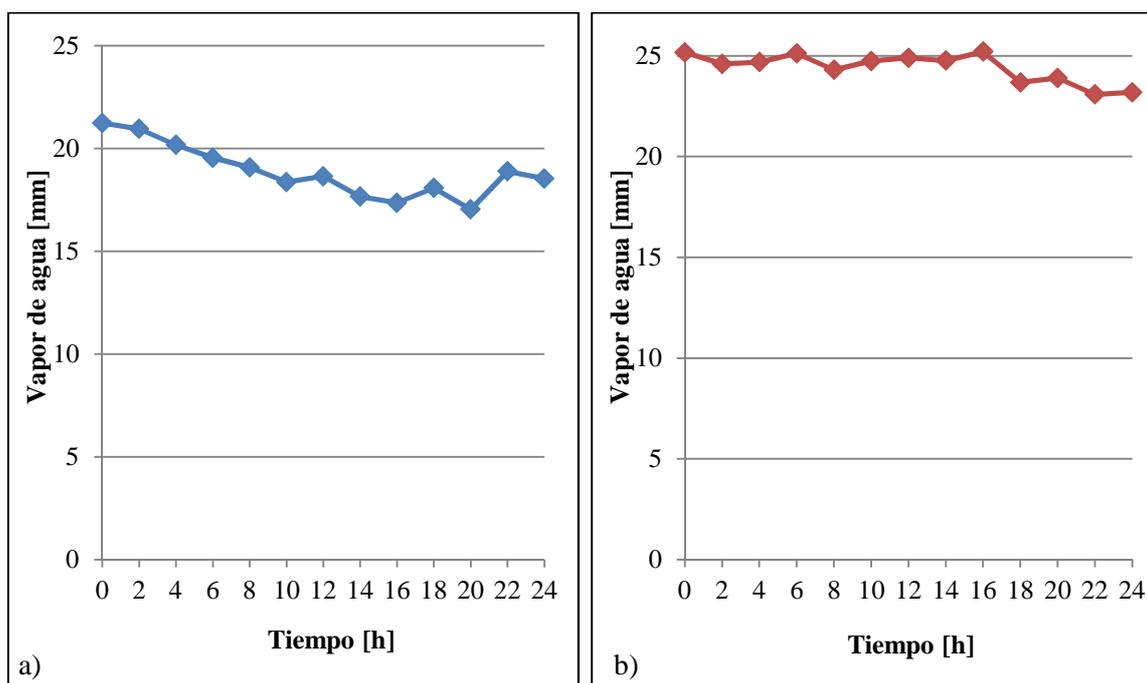


Figura 4.10 Vapor de agua estimado durante el día 254, del año: a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo RIOP

Para obtener los datos en la estación de RIOP se basó en el modelo atmosférico GPT (Global Pressure and Temperature) con valores estándares, posterior a la comparación realizada con las estaciones de monitoreo continuo ISPA y CONZ.

Por lo tanto, para el año 2010 se tiene una media de 18,6mm y un valor máximo y mínimo de $21,24 \pm 0,98$ mm y $17,04 \pm 0,62$ mm, respectivamente. Al contrario del año 2011 en el cual se registró datos no mayores a $25,21 \pm 0,55$ mm y no menores a $23,1 \pm 0,6$ mm y con una media aproximada de 24,7mm.

4.4 VAPOR DE AGUA ANUAL

Para la representación gráfica de la cantidad de vapor de agua anual por día GPS, se realizó una sumatoria de los valores calculados cada 2 horas para completar con la cantidad total de vapor de agua presente en un día, es decir, que para un día se tendrán 13 datos que deberán ser adicionados para obtener el valor total.

4.4.1 Estación de monitoreo continuo CHPI (Cachoeira Paulista – Brasil)

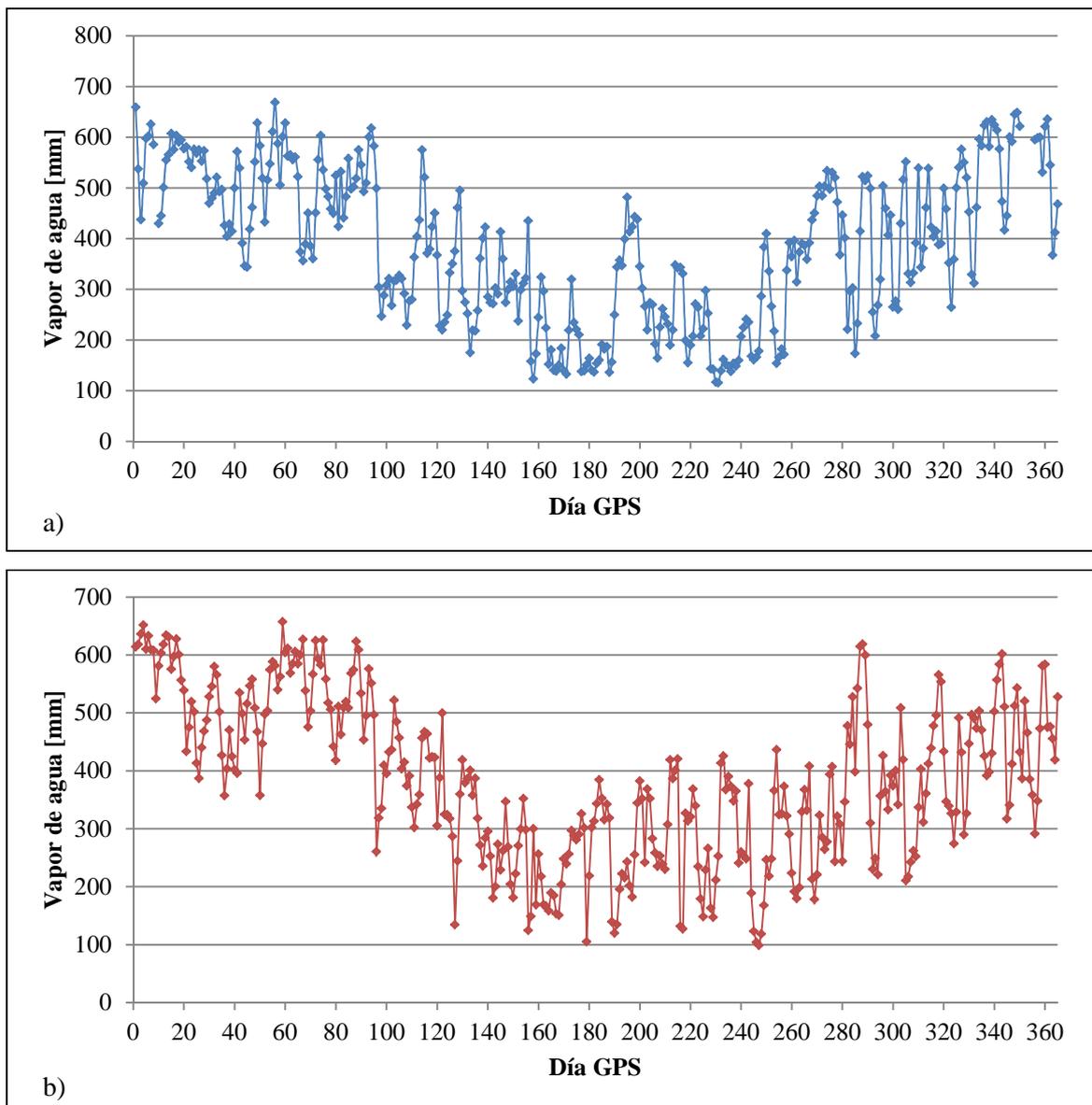


Figura 4.11 Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de CHPI

Es notable la variación de vapor de agua para la estación de CHPI, tanto en el 2010 como en el 2011, principalmente porque entre los 150 y 260 días aproximadamente, los cuales están referidos al 30 de mayo y 17 de septiembre respectivamente, registran una disminución de vapor de agua con valores que llegan a 104,2mm (valor acumulado del día) por la influencia de bajas temperaturas y poca humedad. Por lo tanto, este periodo del año demuestra ser una temporada fría y seca para la región de Brasil con una media de 17,86°C de temperatura y 218,9mm de vapor de agua.

Al comparar el rango anterior, con los primeros 90 días de ambos años, es decir, hasta el mes de marzo aproximadamente, los valores superan los 650mm llegando a un máximo de 668,17mm de vapor de agua en el año 2010 (Figura 4.10a) y en el 2011 un máximo de 657,17mm (Figura 4.10b), en donde claramente se puede definir como una época de verano al estar influenciado por el incremento de la temperatura y el porcentaje de humedad.

A partir de los 95 hasta los 111 días (5 abril – 21 abril) disminuye la cantidad de vapor de agua debido a menor temperatura en un inicio y por haberse registrado precipitaciones de 44mm en el 2010 y de 20mm en el 2011 (Anexo F) durante las 2 semanas.

Precipitación registrada

El Instituto Nacional de Meteorología de Brasil registra constantemente los datos de precipitación para diferentes estaciones que cubren la región. Para el caso de Cachoeira Paulista se escogió a la estación más cercana, ubicada en Passa Quatro al norte de la zona de estudio a una distancia aproximada de 48,5km, como se muestra en la figura 4.12 (A. Cachoeira Paulista y B. Passa Quatro).

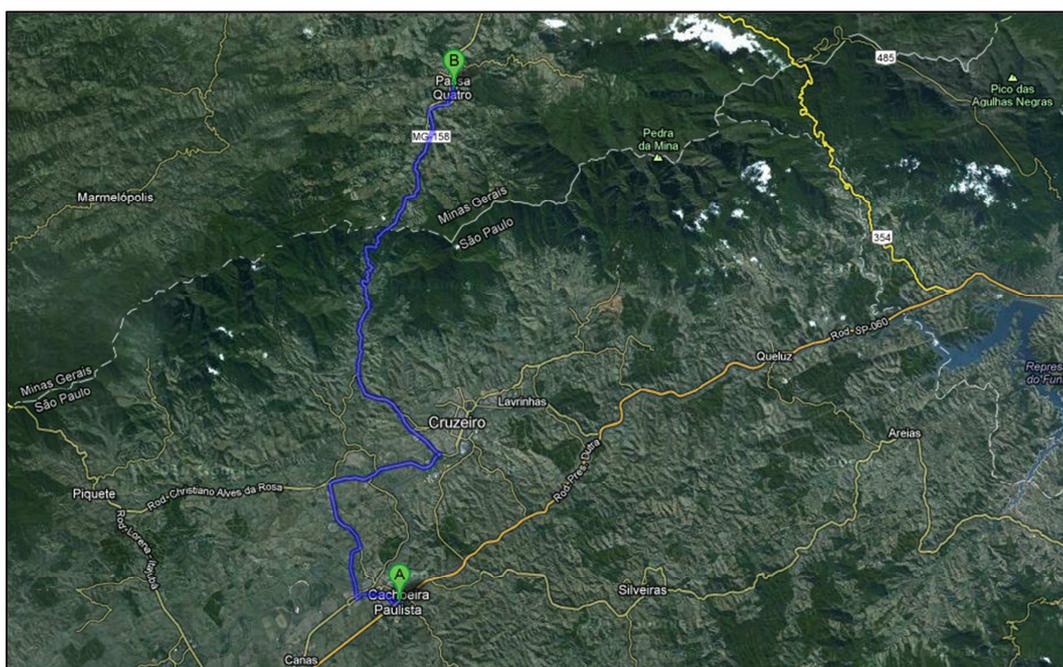


Figura 4.12 Mapa ubicación Passa Quatro y Cachoeira Paulista y distancia entre ambas regiones

Fuente: Google Earth

Los valores registrados de precipitación comparados con la concentración de vapor de agua por día se detallan en el Anexo F para el año 2010 y 2011; en donde, se destacan precipitaciones máximas en el 2010 durante los meses de noviembre y diciembre alcanzando un máximo de 102mm para el mes de noviembre y en el 2011 durante el mes de enero, con una máxima de 171mm.

La figura 4.13 representa los días que presentaron precipitaciones a partir de 1mm y la cantidad de vapor de agua estimada en el mismo día. En ambas gráficas (Figura 4.13 a y Figura 4.13 b), es notoria la similitud de las curvas y es posible suponer que a menor cantidad de vapor de agua se tiene un menor índice de precipitación en el día.

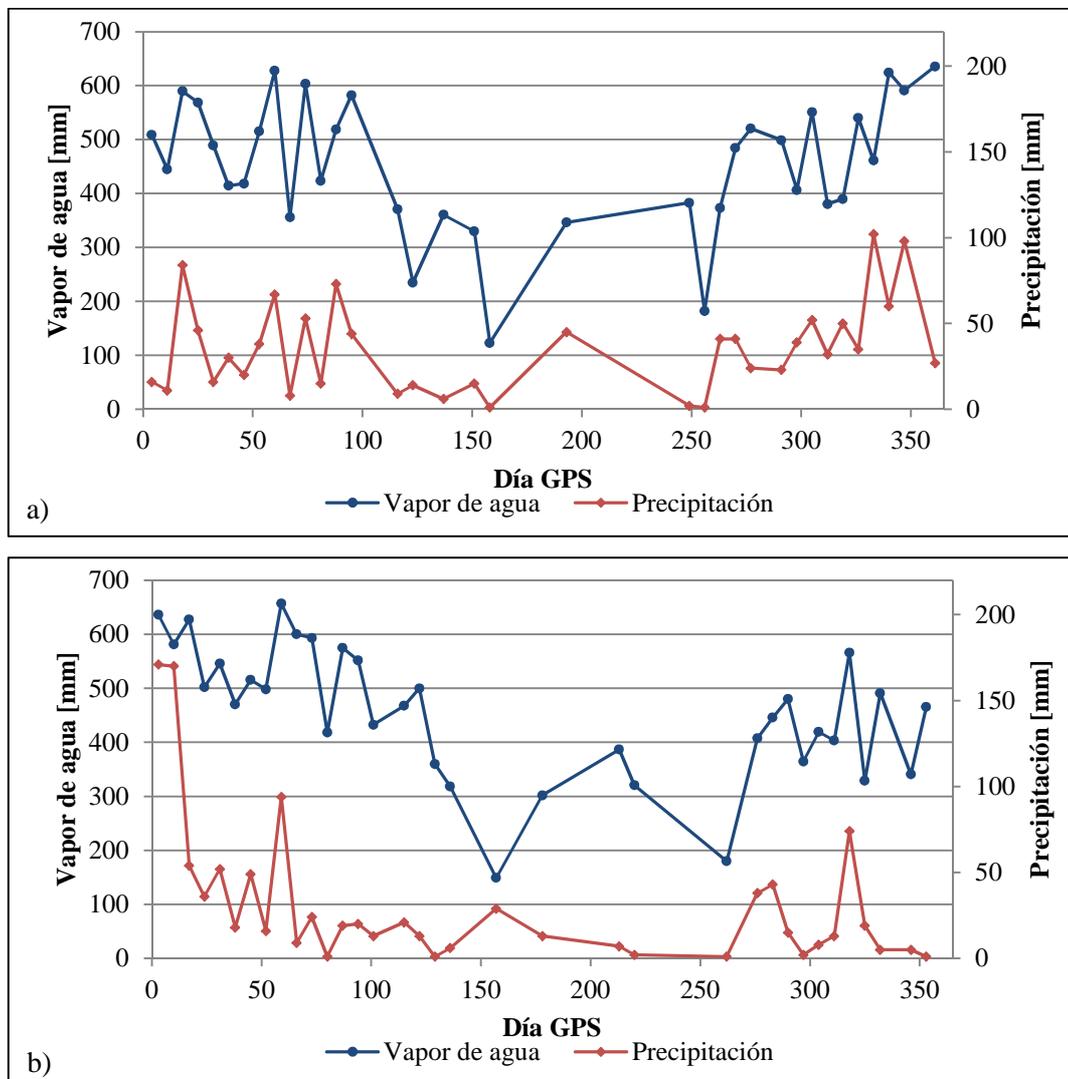


Figura 4.13. Vapor de agua y precipitación registrada en los años a) 2010 y b) 2011

4.4.2 Estación de monitoreo continuo CONZ (Concepción – Chile)

La estación de CONZ se caracteriza por oscilar entre valores más bajos que la estación de CHPI ya que depende más de la variación de la temperatura de la ciudad de Concepción, siendo así, una concentración de vapor de agua máxima de 373,9mm el 24 de enero a una temperatura promedio de 20°C y una concentración mínima de 29,88mm el 25 de junio (176 días) a 7°C, ambos registrados en el 2011. (Figura 4.14)

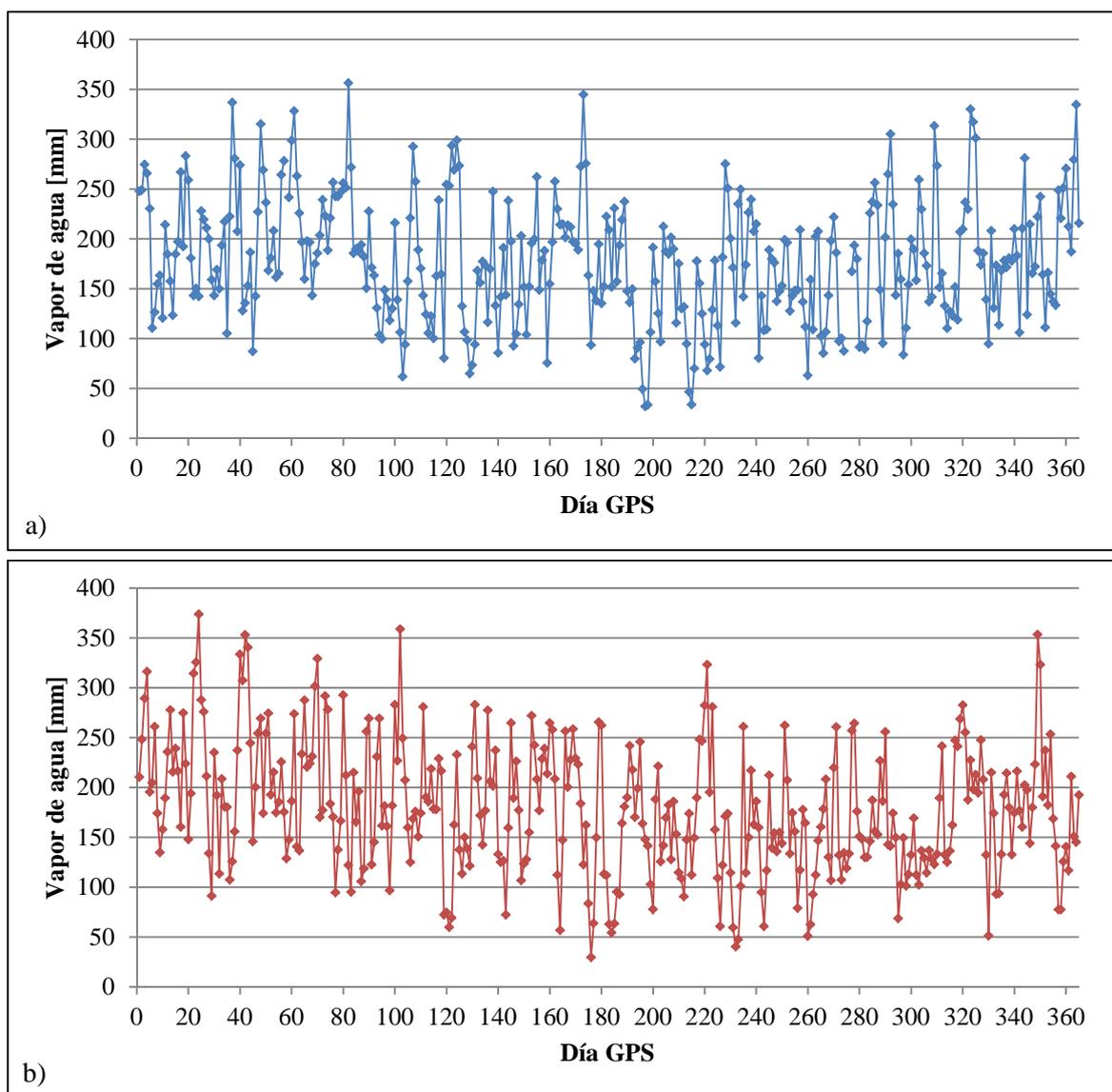


Figura 4.14 Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo CONZ

Sin embargo, entre los días 120 y 260 se encuentra mayor variación de vapor de agua al disminuir e incrementarse repentinamente su concentración, el cual es visible

principalmente en el 2010; por ejemplo, para el día 173 se tiene un valor de 344,8mm de vapor de agua a una temperatura de 11,8°C y para el día 176 que es a solo 3 días, una cantidad igual 93,9mm a 6,7°C. Por lo tanto, se puede asociar a que en esta época del año se presenta repentinas precipitaciones, pero que todavía no son lo suficientemente densas para alcanzar concentraciones máximas; estos días corresponden a los meses de mayo y agosto.

4.4.3 Estación de monitoreo continuo ISPA (Easter Island – Chile)

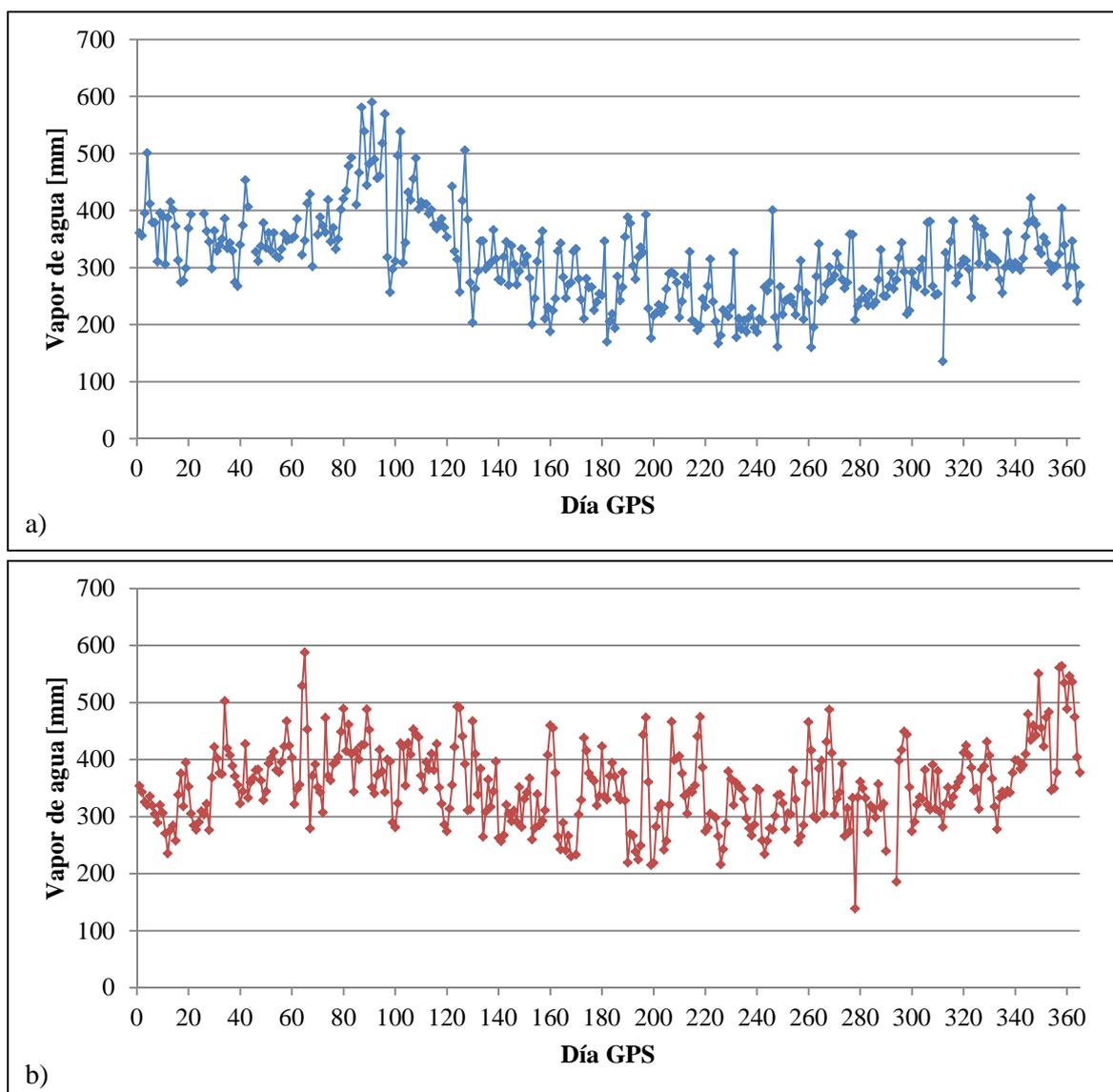


Figura 4.15 Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo ISPA

La concentración de vapor de agua registrado durante los años 2010 y 2011 mantiene una variación constante entre los 550mm y 150mm, con una media de 308,4mm en el 2010 (Figura 4.15a) y 349,41mm en el 2011 (Figura 4.15b).

No obstante, durante los años de estudio sobresale una cantidad equivalente a 581,3mm en el día 87 (28 de marzo) y 588mm en el día 65 (6 de marzo) como valores máximos para el 2010 y 2011, respectivamente y como valores mínimos registrados un 135,8mm el 8 de noviembre del 2010 y 138,8mm el 5 de Octubre del 2011.

A partir de los primeros días del mes de enero hasta el día 90 del mes de marzo, se observa mayor concentración de vapor de agua por ser época de mayores temperaturas y mayor concentración de humedad con una media promedio de 23°C, por ende, la cantidad de vapor registrada oscila entre los 361,1mm y 369,28mm, valores mucho mayores que el promedio general.

En los días 97, 98, 99 y 103 correspondientes al mes de abril, el porcentaje de humedad es menor comparado con los días siguientes, puesto que presenta un 65% frente a un 98% registrado en el día 105 (15 de abril), resultando entonces, una cantidad de vapor de agua promedio de 302,9mm, casi cercano al valor medio del 2010.

4.4.4 Estación de monitoreo continuo MDO1 (Fort Davis – Estados Unidos)

La concentración de vapor de agua calculada para la estación MDO1, ubicada en Fort Davis, varía entre los 9 mm y 500 mm, sin contar con los 7 días en que la concentración se incrementó hasta llegar a los 1145,7mm muy por arriba de la tendencia de la estación. (Figura 4.16)

Resulta incoherente decir que para el día 296, una de las cotas máximas en el 2010, se registró una cantidad de vapor de agua de 1145,67mm, ya que la temperatura promedio medida en el día es de -9°C y la humedad un 23%, valores muy bajos para una concentración alta de vapor de agua, al igual que para el día 261 del 2011 con una cantidad total de 1050,75mm a -9°C.

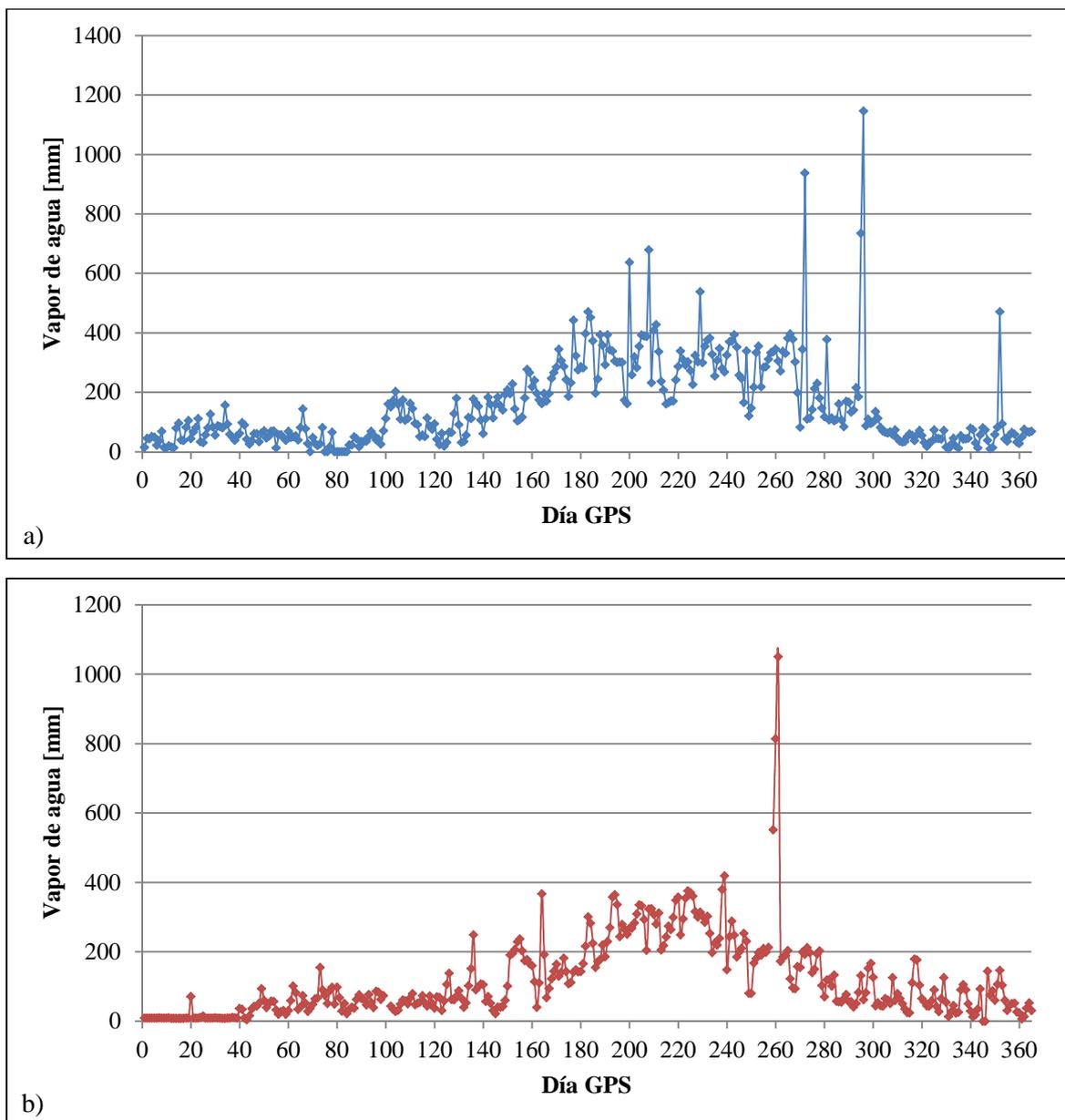


Figura 4.16 Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo MDO1

Por lo tanto, los días en que mayor concentración de vapor de agua se presenta son entre los 141 y 280 días, es decir durante los meses de mayo hasta septiembre, con una media de 282,3mm en el 2010 y 203,6mm en el 2011, registrando cotas máximas igual a 937,6mm y 1050,75mm para los años 2010 y 2011, respectivamente y una mínima de 59,21mm en el 2010.

Por otro lado, si se observa los primeros días del año hasta aproximadamente los 140 días (1 de enero – 20 de mayo) y a finales de cada año, a partir de los 300 a los 365 días

(27 de octubre – 31 de diciembre), la cantidad de vapor de agua es mucho más baja, con una media de 51mm en el 2010 y en el 2011 una cantidad promedio de 47,4mm, lo cual hace referencia a bajas temperaturas dentro de este rango, con una media de 10,16°C. La menor cantidad de vapor de agua registrado durante estos días es de 9,15mm el día 331 del 2010 (27 de noviembre) y 2,75mm el día 43 del 2011 (12 de febrero).

4.4.5 Estación de monitoreo continuo OHI2 (O'Higgins – Antártida)

La estación chilena de O'Higgins ubicada en la Antártida oscila entre los 250mm y 0mm de concentración de vapor de agua (Figura 4.17), donde se presentan cambios significantes principalmente entre los 160 días hasta aproximadamente los 280 días en el 2010 y en el 2011, un rango más amplio, a partir de los 100 días; en el cual, la cantidad de vapor de agua disminuye debido a bajas temperaturas propio de la época invernal (solsticio de junio).

Esta época caracterizada especialmente por alcanzar un mínimo 11,61mm a los 277 días en el 2011 (4 de octubre), alcanzando una temperatura promedio de -40°C; sin embargo, en el día 147 la concentración de vapor de agua se incrementa hasta 152,3mm en función del incremento de humedad a un 20%, comparado con días anteriores.

Para el año 2010 es muy difícil determinar la mínima cantidad de vapor de agua por presentarse ciertas anomalías en el cálculo de este parámetro, que puede ser por fallas en los sensores de humedad y temperatura, motivo por el cual no se han considerado estos valores en la figura 4.17a.

Por otro lado, a inicios y finales del año la cantidad de vapor de agua comienza a incrementarse debido a la presencia de humedad y mayor temperatura, por estar ya en el solsticio de diciembre o verano para la región de la Antártida, llegando a un máximo en el 2010 de 231,8mm el día 67, durante el mes de marzo y en el 2011 de 216,18mm el 4 del mes de enero.

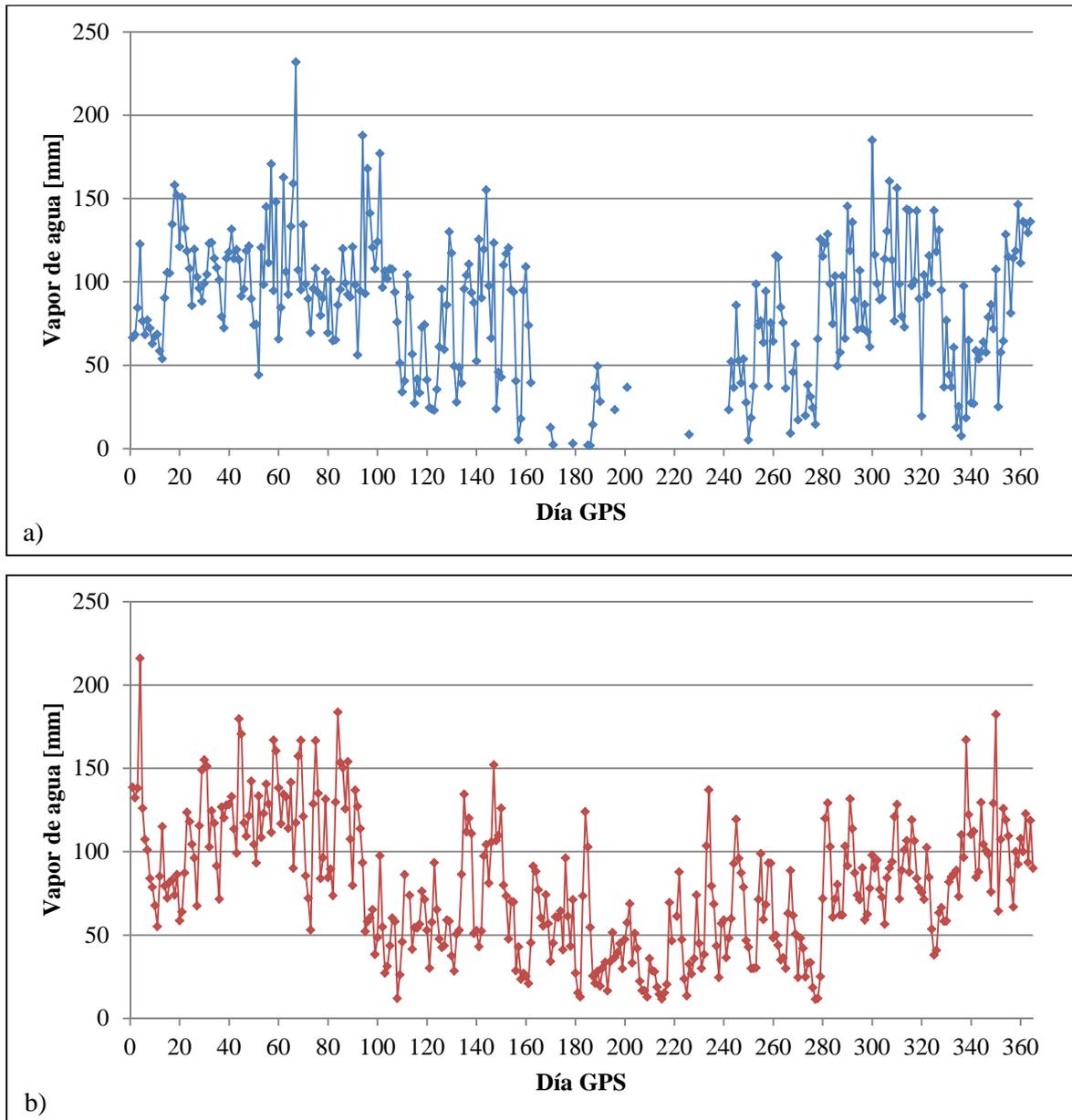


Figura 4.17 Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de OHI2

4.4.6 Estación de monitoreo continuo SCUB (Santiago de Cuba – Cuba)

Al ser Santiago de Cuba una zona tropical se presencia mayor cantidad de vapor de agua durante ambos años, con una variación entre los 150 y 1000mm de concentración de vapor, sin considerar los máximos obtenidos en el primer año (Figura 4.18).

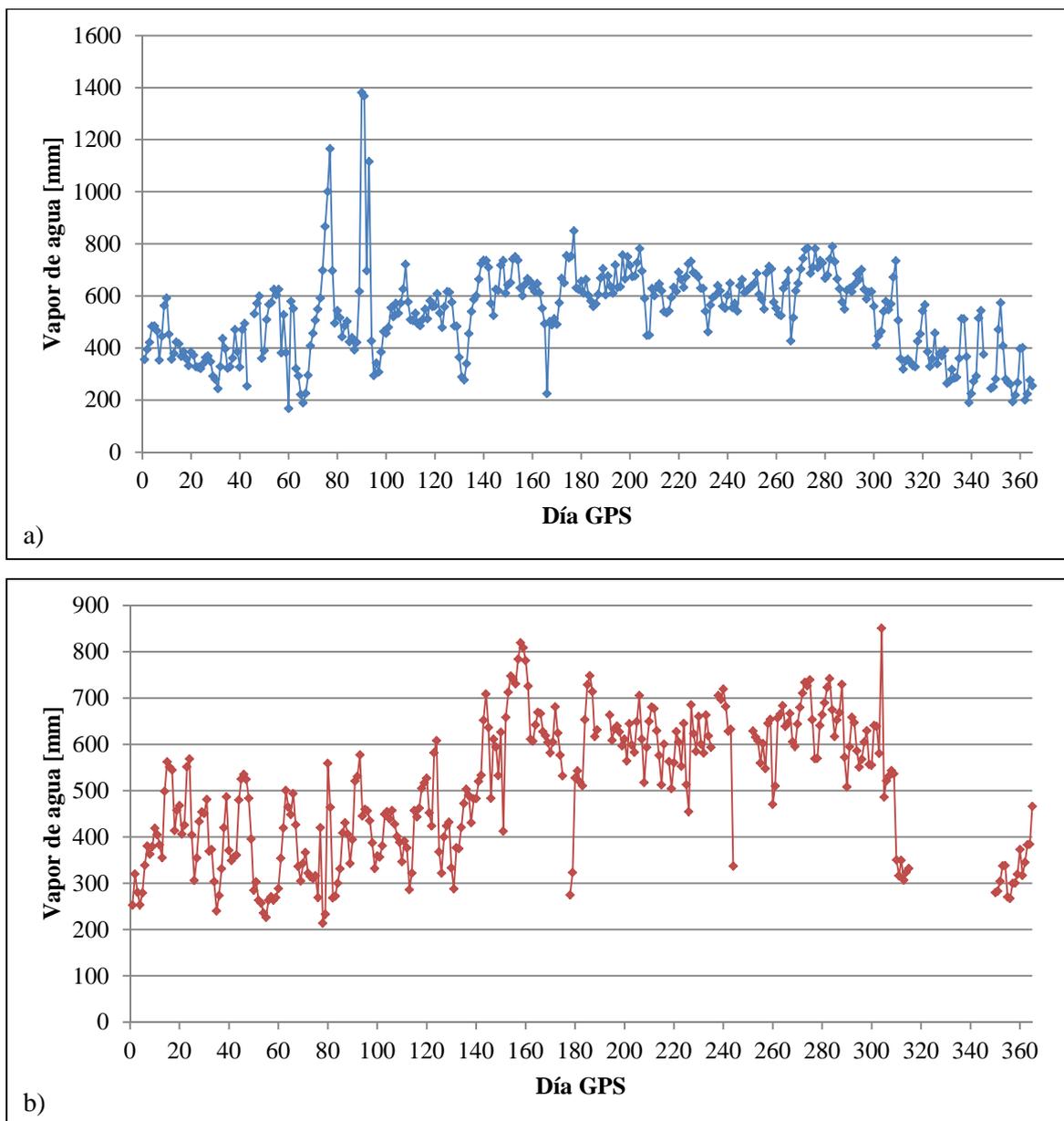


Figura 4.18 Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de SCUB

El día 90 del 2010 muestra una cantidad máxima de vapor de agua de 1380,9mm (Figura 4.18a) a una temperatura de 25°C que comparado con el 2011, que tiene 394,24mm de concentración de vapor, resulta un valor mucho menor de la mitad, lo cual depende principalmente de la humedad que alcanzó durante el día en un 85%.

Además, cabe considerar que para la estación de SCUB la época más húmeda y por ende con mayor cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera, es a partir del día 140 al día 300 con una media equivalente a 633,2mm en el 2010 y 627,1mm en el 2011,

comprendidos entre los meses de junio y octubre, con un máximo de 849,6mm y 819,6mm para el 2010 y 2011 respectivamente.

En los días 244 del 1 de septiembre y 178 del 27 de junio del 2011, la cantidad de vapor de agua es mucho menor que el rango anterior, alcanzando un mínimo de 275,3mm, ya que no todas las horas fueron rastreadas durante el día y por ende, se presenta una menor concentración total de vapor de agua. Principalmente para el día 244, que por presencia del fenómeno natural el Huracán Irene, la estación meteorológica no rastreó los datos a partir de las 14h; en la figura 4.19 por parte del Observatorio de la Nasa, se muestra a la estación de monitoreo continuo SCUB intervenida por el Huracán.

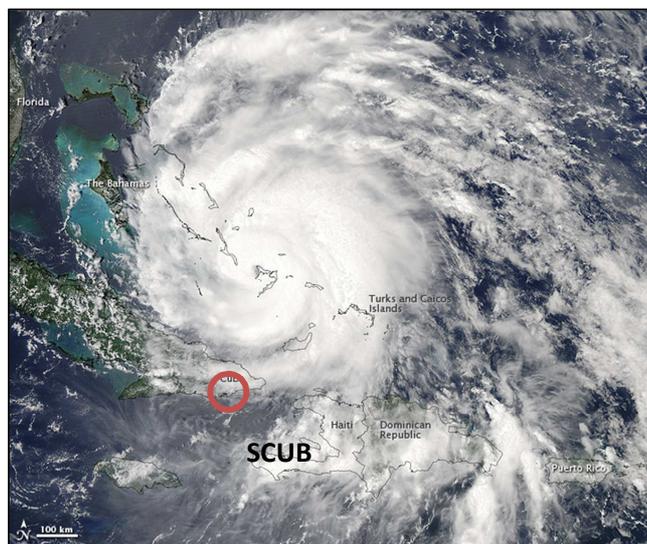


Figura 4.19 Huracán Irene

Fuente: NASA – Observatorio de la Tierra

La mínima cantidad de vapor de agua que se presentó durante ambos años es de 167,75mm en el día 60 del 2010, y que al igual que el valor máximo, se registró durante el mes de marzo.

4.4.7 Estación de monitoreo continuo RIOP (Riobamba – Ecuador)

Los resultados obtenidos en la estación RIOP, no muestran gran cambio en la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera para los 2 años, por lo tanto se mantiene en una media igual a 308,1mm y 292mm para el año 2010 y 2011 (Figura 4.20),

respectivamente, cabe recalcar que para calcular el vapor de agua se basó en el modelo atmosférico GPT, después de comprobar su validez y ajuste a la realidad.

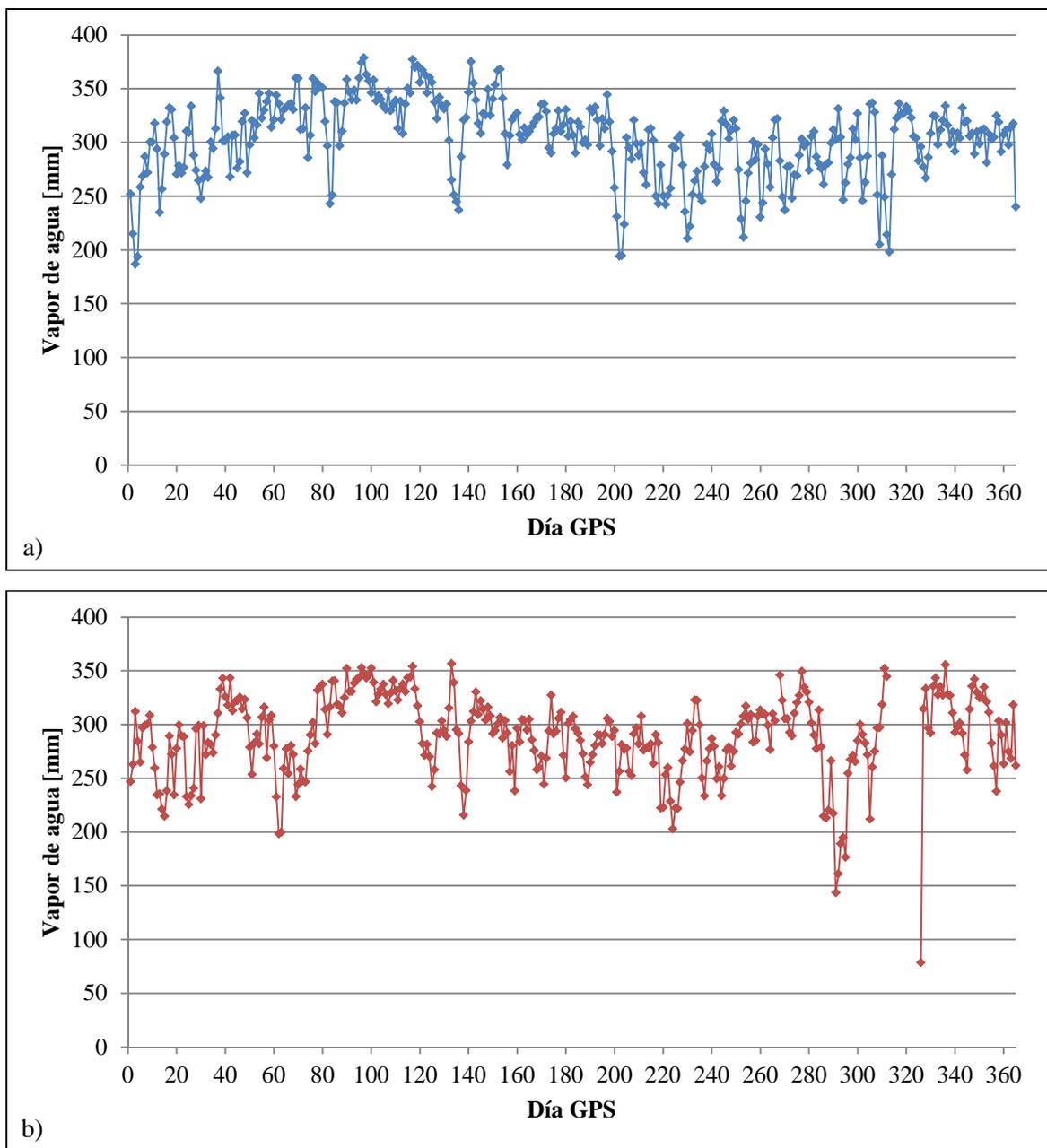


Figura 4.20 Vapor de agua durante el año a) 2010 y b) 2011 para la estación de monitoreo continuo RIOP

De manera que, al analizar los datos la concentración de vapor no supera los 400mm y no decae menos que los 140mm, a excepción del día 326 del 2011 (22 de Noviembre) que registró poca cantidad de vapor de agua equivalente a 78,5mm, muy por debajo de la

media anual, dado que los parámetros se calcularon a partir de las 18h del día siendo un factor limitante para obtener una concentración mayor.

La variación de vapor de agua entre los 80 y 125 días, referentes al 21 de marzo y 5 de mayo, mantienen una media de 345mm y 331mm para el 2010 y 2011 respectivamente, mayor que la media general con temperaturas entre los 20°C. Los datos de vapor de agua registrados para el año 2010 se muestran en el Anexo E.

4.5 MODELACIÓN MATEMÁTICA

Las gráficas que se presentarán a continuación son la representación de la cantidad de vapor de agua total para cada mes considerando los 2 años de estudio, es decir que por mes se sumó el valor de vapor de agua total de los días que lo comprenden.

A partir de las gráficas resultantes, se buscó modelar la tendencia de concentración de vapor de agua por mes y dar a su vez un seguimiento a futuro de este parámetro, considerando las siguientes estaciones en estudio, CHPI, CONZ, ISPA, MDO1, OHI2, SCUB y RIOP.

Para modelar la serie de tiempo de cada una de las estaciones en estudio, se debe considerar que la relación entre la variable dependiente, vapor de agua, está en función de la variación en el tiempo. Por ende se determinó la tendencia de la serie y su periodicidad con el coeficiente de autocorrelación.

4.5.1 Estación de monitoreo continuo CHPI (Cachoeira Paulista – Brasil)

La estación de CHPI muestra una variación casi simétrica, con una tendencia que va decreciendo al finalizar el 2011, en el cual los valores más bajos se obtuvieron durante los meses de mayo a septiembre alcanzando un mínimo de 6298,32mm registrado en junio del 2010 (Figura 4.21). Esta temporada presenta poca concentración de vapor de agua debido a las bajas temperaturas y a un índice menor de precipitación.

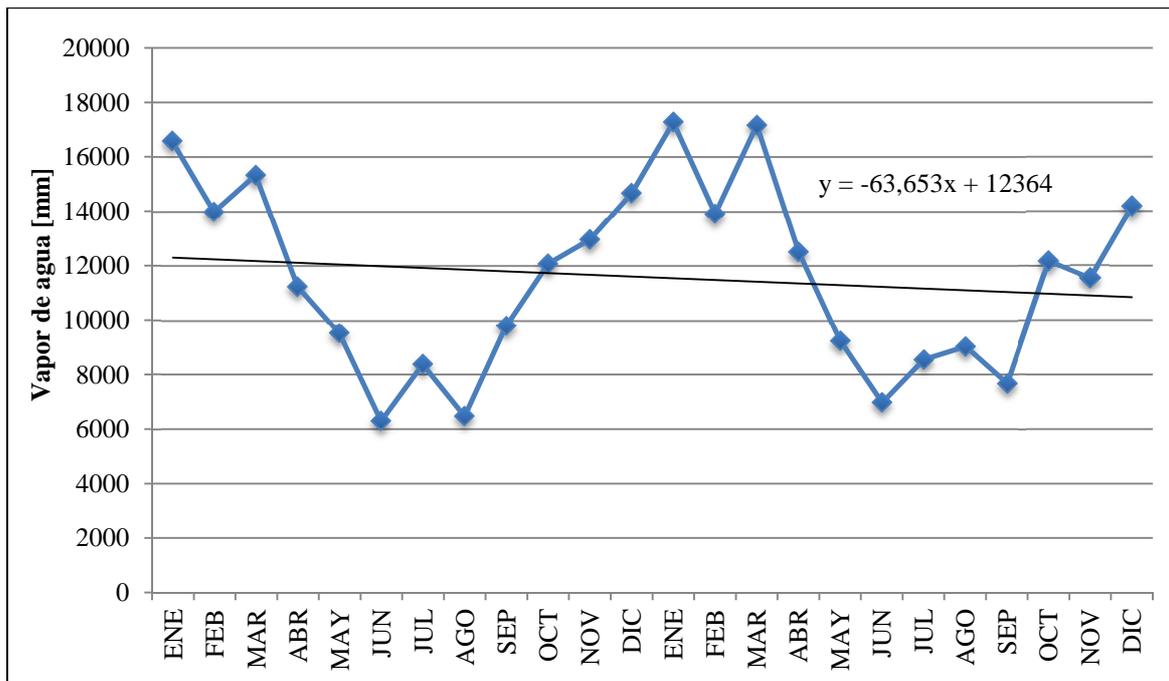


Figura 4.21 Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de monitoreo continuo CHPI

Asimismo agosto, uno de los meses con baja precipitación, presenta un valor de vapor de agua de 6473,29mm y que según datos registrados por el Centro de Pronóstico del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC), la precipitación total registrada en el mes es de 0 a 1mm, tal y como se muestra en la figura 4.22.

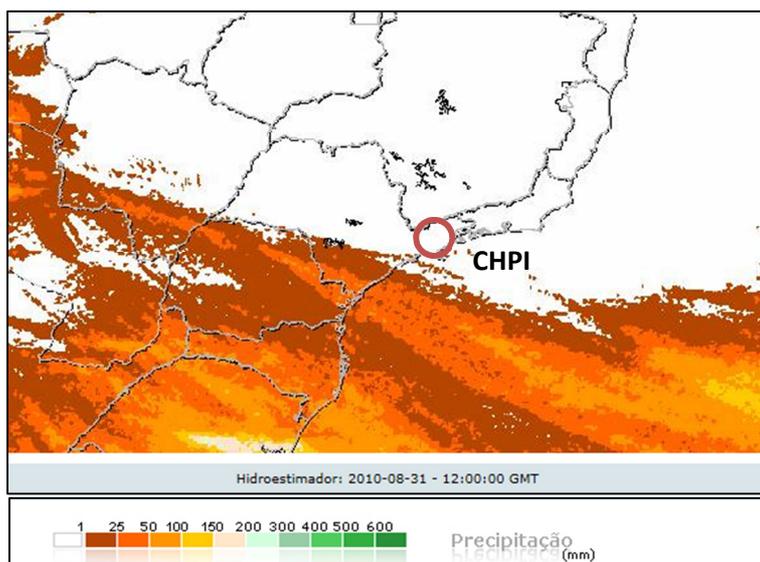


Figura 4.22 Datos de Precipitación Mensual por Satélite – Agosto 2010

Fuente: División de Satélite y Sistemas Ambientales. Centro de Pronóstico del Tiempo y Estudios Climáticos (CEPTEC). Instituto Nacional de Investigación Espacial (INPE). Brasil

Al contrario, de los meses de marzo y enero en que la concentración de vapor de agua alcanza los 15339,05mm en el 2010 y 17272,47mm en el 2011, debido al incremento de la temperatura y a mayor porcentaje de humedad.

En la figura 4.23 se observa el valor de precipitación total para el mes de enero del 2011 el cual alcanza los 600mm, por ende, se confirma la presencia de mayor cantidad de vapor de agua en la época más húmeda para Cachoeira.

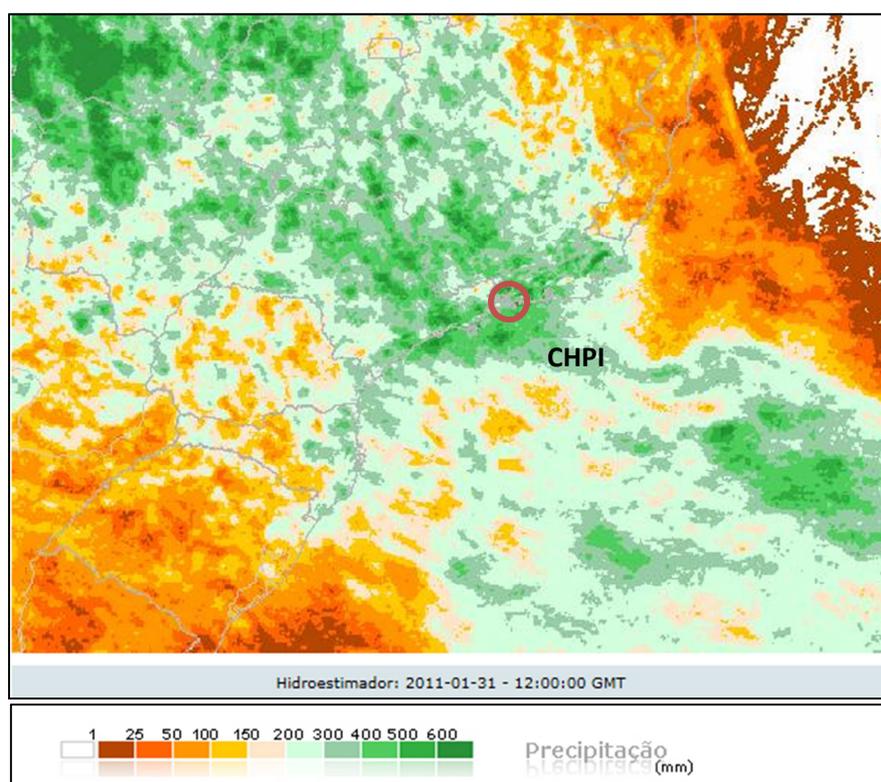


Figura 4.23 Datos de Precipitación Mensual por Satélite – Enero 2011

Fuente: División de Satélite y Sistemas Ambientales. CEPTEC. INPE. Brasil

4.5.2 Estación de monitoreo continuo CONZ (Concepción – Chile)

La cantidad de vapor de agua presente para la estación de monitoreo continuo CONZ varía entre los 7000mm y 4500mm con una media anual de 5415mm, en el cual los meses con menor concentración de vapor de agua llegan a un mínimo de 4502,47mm (Figura 4.24).

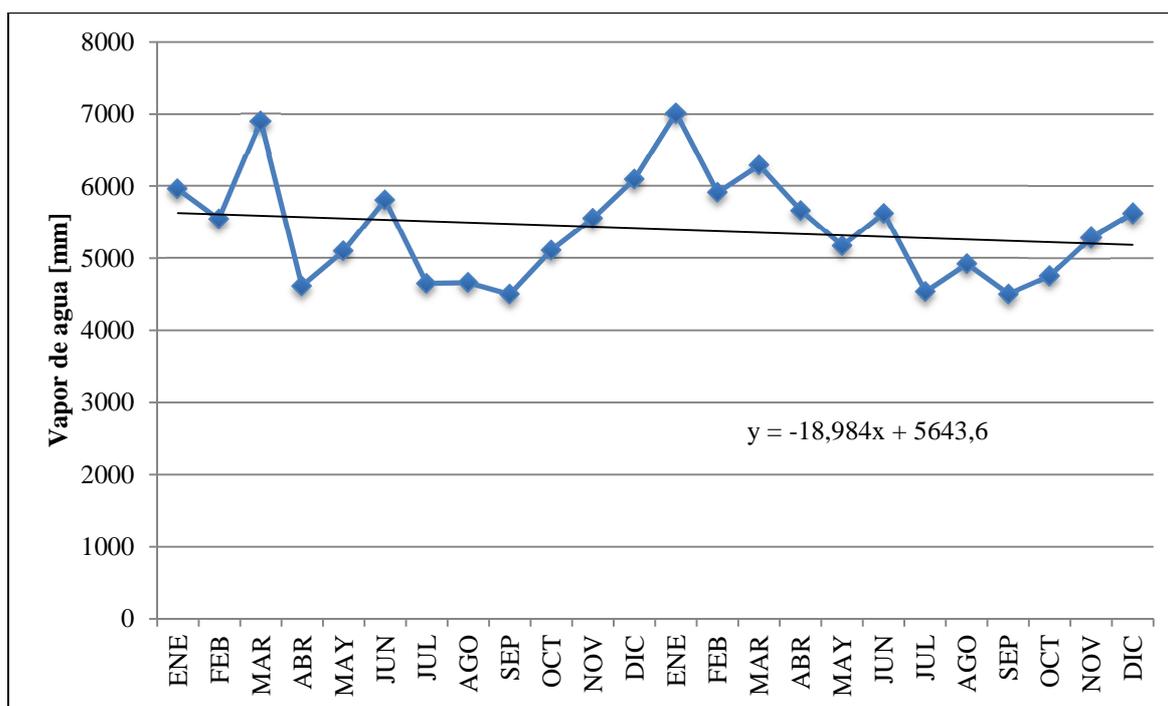


Figura 4.24 Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de monitoreo continuo CONZ

A partir del mes de mayo hasta agosto la cantidad de vapor de agua presente para la estación, es cuando empieza a disminuir hasta obtener las mínimas concentraciones debido a un déficit de precipitaciones entre -40% y -55%¹ para el 2011 y del -59% para el 2010.

Previo a una temporada seca, las concentraciones de vapor de agua oscilan entre 6123,58mm, valor que sobrepasa la media anual obtenida en ambos años, es decir, que para los meses de enero, febrero y marzo, que llegan a un máximo de 7012,12mm de vapor de agua, se presenta mayor porcentaje de humedad, con una diferencia máxima de precipitación de 20mm respecto al promedio climatológico registrado para Concepción, como se muestra en la figura 4.25.

¹ Aceituno, Patricio, Boletín climático, <http://met.dgf.uchile.cl/clima/>, diciembre 2012, enero 1013.

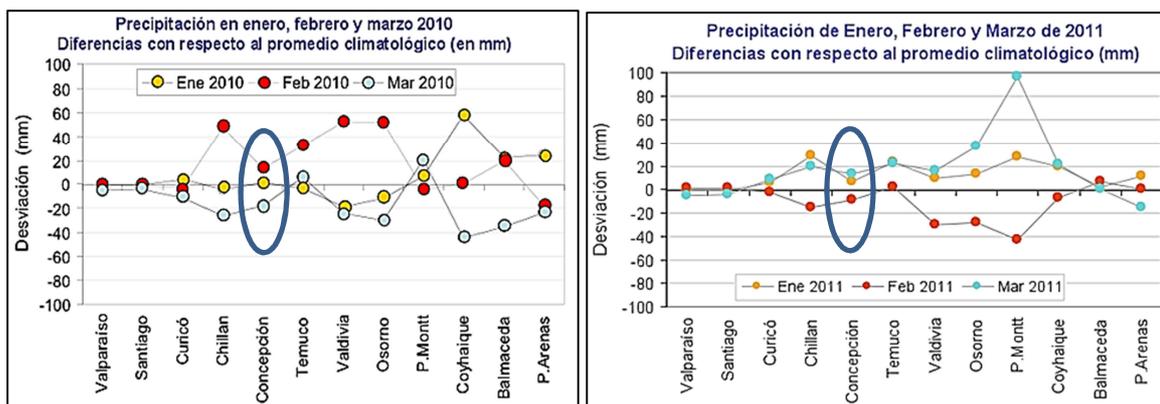


Figura 4.25 Desviación respecto a las precipitaciones normales

Fuente: Aceituno, 2012

El mes de abril, es uno de los meses con menor concentración de vapor de agua a 4614mm en el 2010 debido a temperaturas más bajas a una temperatura promedio de 12°C, por ende, registrándose diferencias mínimas a -1,5°C del valor promedio.

4.5.3 Estación de monitoreo continuo ISPA (Eastern Island – Chile)

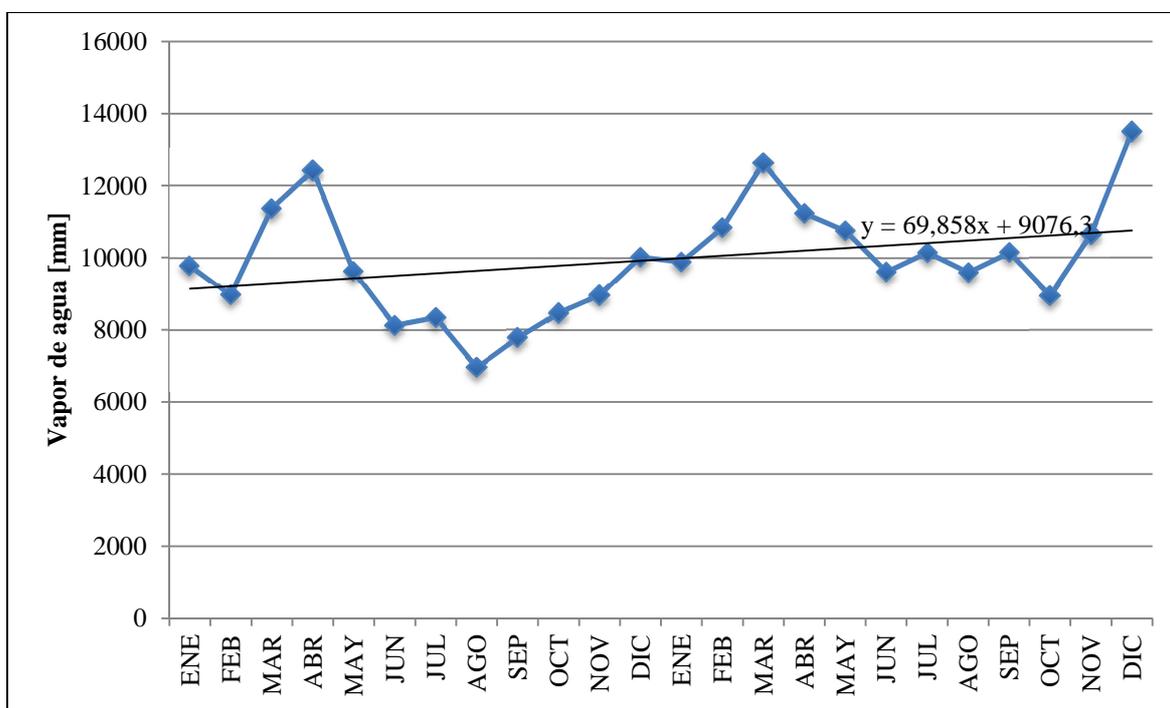


Figura 4.26 Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de monitoreo continuo ISPA

La estación de ISPA, al contrario de las demás estaciones presenta una tendencia ascendente, en la cual la variación de vapor de agua permanece simultánea entre uno y otro año, entre los 1400mm y 6000mm, que se muestra en la figura 4.26.

Para los meses de junio a octubre la cantidad de vapor de agua es menor, llegando a un mínimo de 6956,6mm en agosto del 2010, debido a bajas temperaturas y menor humedad en la Isla de Pascua, y con una media equivalente a 8708,73mm (considerando ambos años), motivo por el cual se origina mayores precipitaciones principalmente para los meses de mayo y junio.

Al contrario de los meses comprendidos entre diciembre y abril que presentan mayor concentración de vapor de agua, alcanzando un máximo de 13497,3mm, debido a que las temperaturas ascienden hasta aproximadamente 24°C con un índice menor de precipitaciones comparado con el rango anterior.

4.5.4 Estación de monitoreo continuo MDO1 (Fort Davis – Estados Unidos)

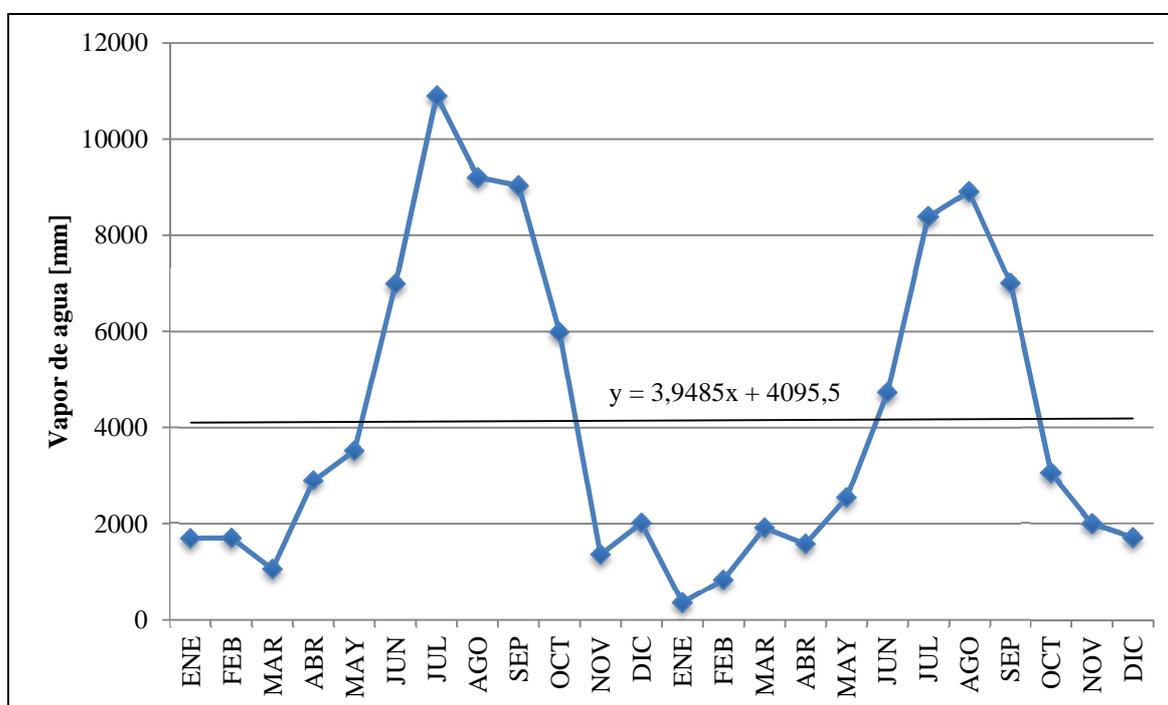


Figura 4.27 Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de monitoreo continuo MDO1

En la figura 4.27 se observa el seguimiento de vapor de agua obtenido posterior de haber sumado el valor diario para cada mes, por lo tanto, no se diferencia una variación contundente entre el año 2010 y 2011, registrando máximas y mínimas concentraciones en los mismo meses. Siendo de diciembre a marzo, los meses que menor vapor de agua presentan, a temperaturas mínimas aproximadas a 10,2°C, y menor índice de precipitaciones.

Los meses de julio y agosto que presentan mayor concentración de vapor de agua son meses en que mayor presencia de tormentas y huracanes existe. Sin embargo, en junio del 2010, a una concentración de 6985,2mm se registró una de las tormentas tropicales denominada “Alex” a partir del 29 de junio hasta finales de julio en la estación de monitoreo continuo MDO1 como se muestra en la figura 4.28, lo cual generó un incremento en la concentración total de vapor de agua sobrepasando los 10000mm para el mes de julio.

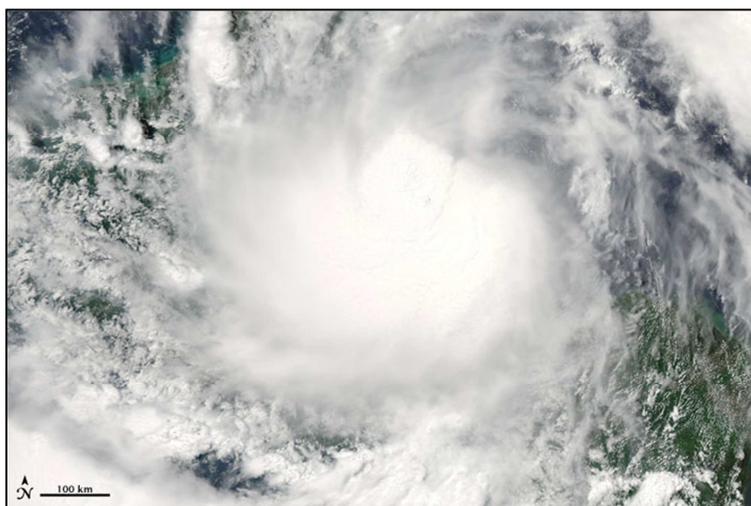


Figura 4.28 Tormenta tropical Alex
Fuente: NASA – Observatorio de la Tierra

Después del paso de la tormenta, donde el número de precipitaciones fue mayor que el promedio normal, en los meses de octubre a noviembre esta concentración de vapor de agua empieza a disminuir en aproximadamente 4000mm (año 2010), comparado con el 2011 en donde la diferencia es mucho menor.

4.5.5 Estación de monitoreo continuo OHI2 (O'Higgins – Antártida)

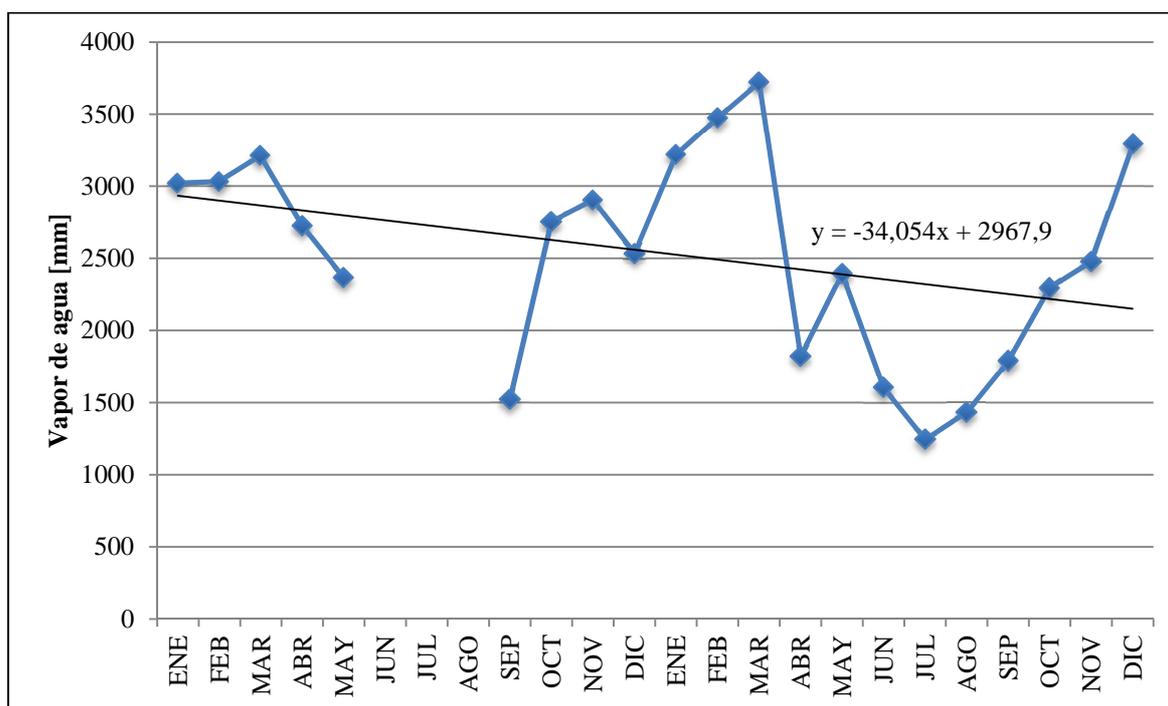


Figura 4.29 Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de monitoreo continuo OHI2

La estación de OHI2, ubicada en la Antártida, presenta una mayor variación de vapor de agua debido a las condiciones climáticas de la región, variando entre los 3700mm y 1000mm aproximadamente, valor total obtenido en el mes (Figura 4.29).

Por lo tanto, desde el mes de junio a noviembre se concentra una menor cantidad de vapor de agua, alcanzando un valor máximo y mínimo de 2904,7mm y 1243,4mm respectivamente. En los meses de junio, julio y agosto del 2010, la concentración obtenida en la mayoría de los días fueron valores negativos, ya sea por motivos del propio del receptor meteorológico o por condiciones climáticas que se debería revisar en un análisis más detallado, motivo por el cual estos meses no se ha considerado dentro de la serie y la modelación matemática.

Por otra parte, se presenta mayor concentración de vapor de agua a partir de diciembre hasta abril con un valor promedio de 3120,3mm y una máxima de 3718,8mm en el mes de marzo del 2011, debido a al incremento de temperatura del solsticio de diciembre.

4.5.6 Estación de monitoreo continuo SCUB (Santiago de Cuba – Cuba)

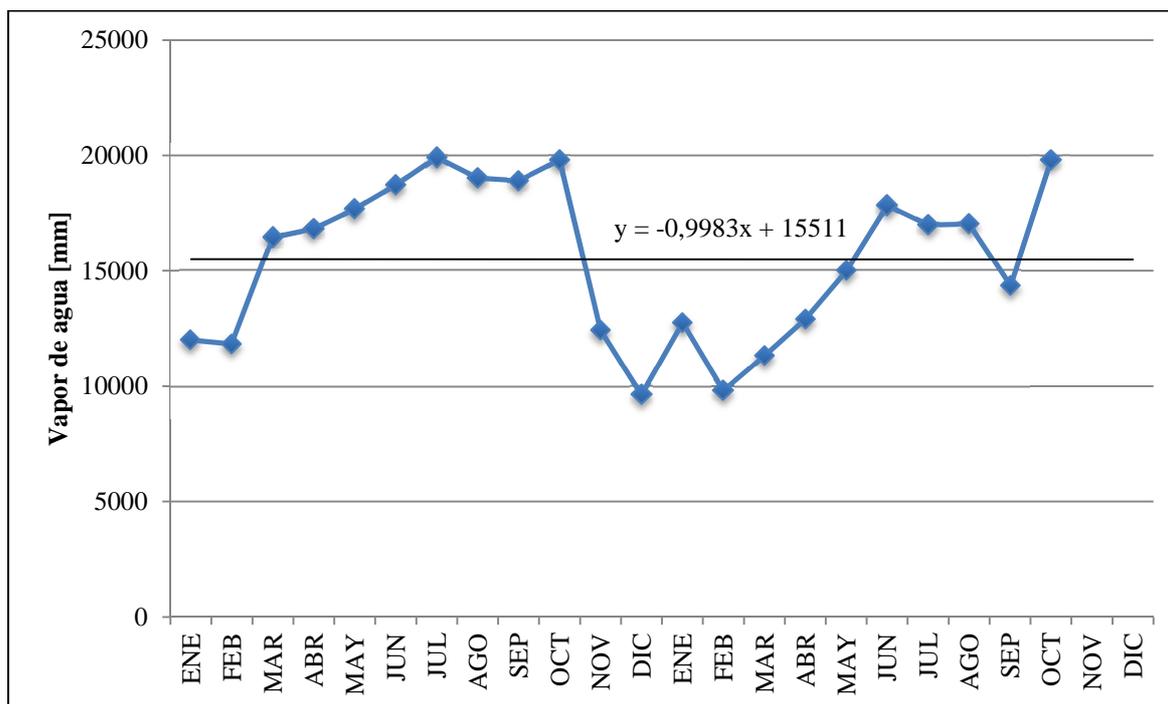


Figura 4.30 Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de monitoreo continuo SCUB

La cantidad de vapor de agua para la estación de Santiago de Cuba varía entre los 20000mm y 10000mm, con un valor promedio anual de 16631,8mm, del cual la mayor parte de meses presenta valores superiores a 15000mm de vapor de agua (Figura 4.30).

Los meses de menor concentración son de noviembre a marzo alcanzando un mínimo de 9641,6mm en el mes de diciembre del 2010, que según datos del Instituto de Meteorología de Cuba fue considerado el mes más frío de la historia al presentar una temperatura media de 19,5°C el cual representa una diferencia de -3,5°C del promedio normal, como se muestra en la figura 4.31.

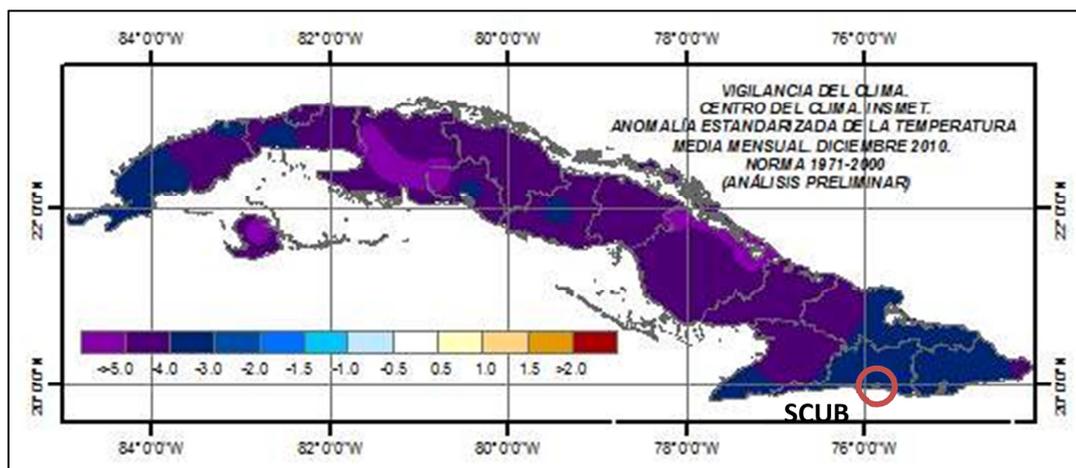


Figura 4.31 Mapa de Anomalía estandarizada de la temperatura media mensual Diciembre 2010

Fuente: Instituto de Meteorología de la República de Cuba

Asimismo, para el mes de noviembre del mismo año a una concentración de vapor de agua de 12428,2mm se registró el Huracán Tomas, originando mayor número de precipitaciones entre los 150mm a una temperatura promedio de 23,7°C. (Figura 4.32)

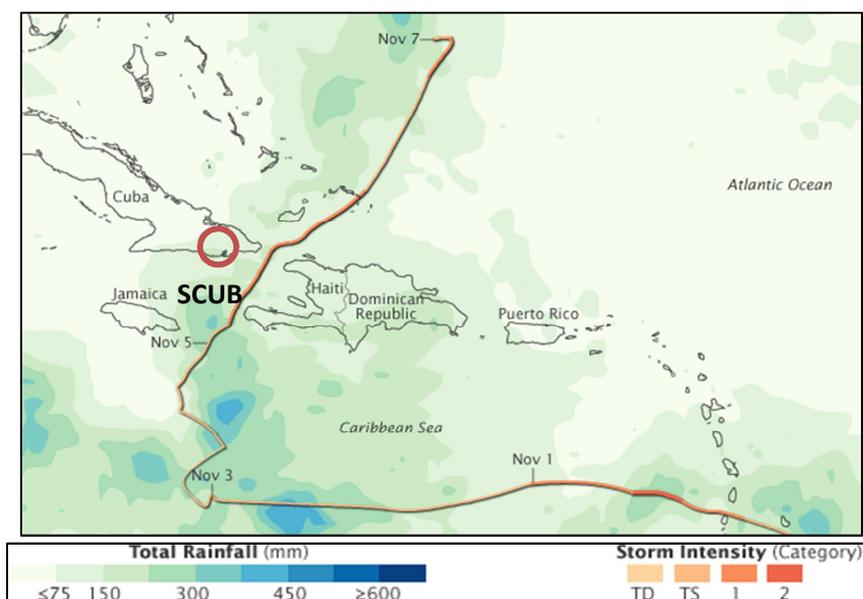


Figura 4.32 Precipitaciones por Huracán Tomas

Fuente: NASA – Observatorio de la Tierra

Por otra parte, a partir del mes de mayo a octubre se observa mayor concentración de vapor de agua alcanzando un máximo de 19915,9mm en julio del 2010, al igual que octubre en ambos años presenta un valor aproximado de 19810mm de vapor de agua,

debido a mayores temperaturas entre 24°C y superando la media mensual julio con 27,5°C (figura 4.33). En el mes de septiembre se observa menor concentración de vapor de agua debido a que no se obtuvieron archivos meteorológicos desde el día 245 (2 septiembre) hasta el día 251 (8 septiembre)

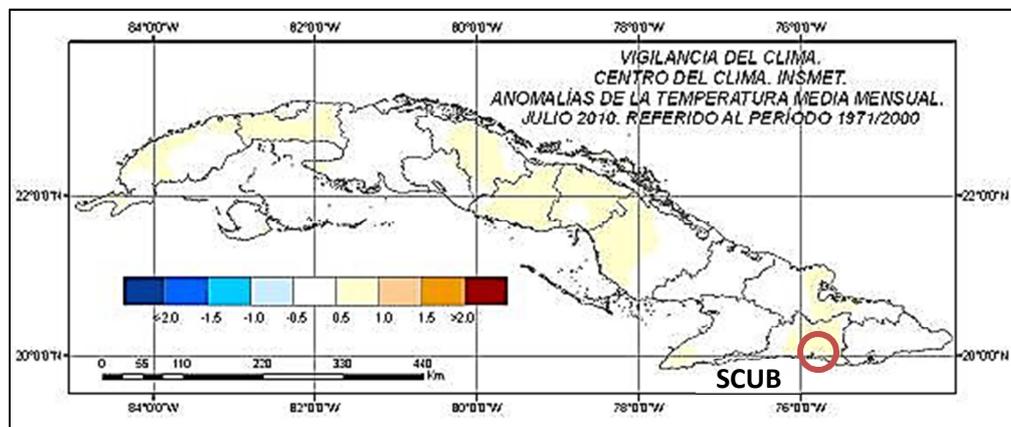


Figura 4.33 Mapa de Anomalía estandarizada de la temperatura media mensual Julio 2010

Fuente: Instituto de Meteorología de la República de Cuba

4.5.7 Estación de monitoreo continuo RIOP (Riobamba – Ecuador)

En la figura 4.34 se puede observar la variación de vapor de agua para el año 2010 y 2011, el cual no se sobrepasa de los 8000mm y 10500mm de vapor total obtenido para cada mes, con un valor máximo de 10423,4mm en abril del 2010 y mínima de 8220,1mm en agosto del 2011.

Según los datos obtenidos mediante el modelo atmosférico, el cambio de concentración de vapor de agua en cada uno de los meses varía constantemente, siendo de marzo a junio del 2010 y de marzo a mayo del 2011 los meses de mayor valor de vapor de agua, con una media de 10056,2mm debido a mayor concentración de humedad, por lo tanto, para el mes de abril se tiene un máximo del 98% de humedad en ambos años.

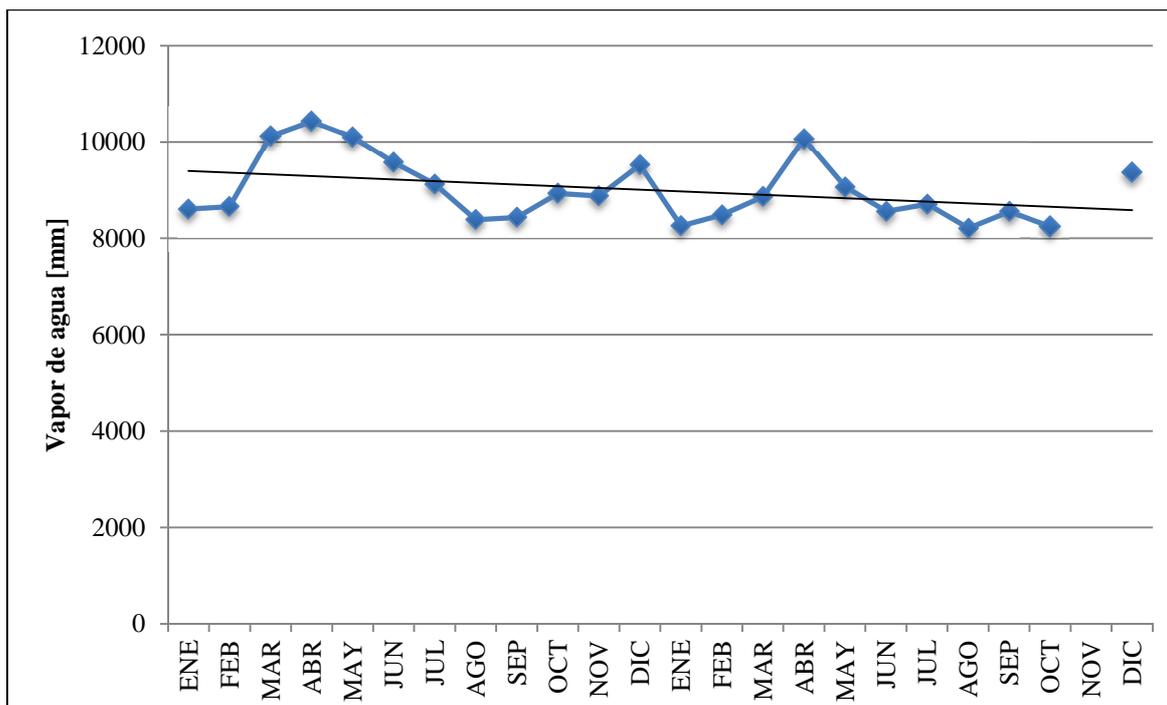


Figura 4.34 Vapor de agua mensual total año 2010 y 2011 – estación de monitoreo continuo RIOP

No obstante, para los meses de agosto, septiembre y octubre alcanzan las mínimas concentraciones de vapor de agua, debido a un menor porcentaje de humedad con un 50% aproximadamente y una temperatura entre los 19°C.

Según datos del INAMHI, la mayor precipitación registrada en el 2011 es en el mes de febrero con un valor de 48mm y una cantidad de vapor de agua igual a 8493,1mm; a comparación del 2010 en donde la precipitación fue mayor en el mes de enero. En la tabla 4.2 se puede observar parámetros registrados de precipitación total en el 2011, el cual alcanzó un porcentaje anual mayor que el índice anual de precipitación normal.

Tabla 4.2 Parámetros meteorológicos registrados en el año 2011

Parámetro	Precipitación normal acumulada [mm]	Precipitación acumulada año 2011 [mm]	Precipitación máxima 24h [mm]	Temperatura máxima media normal [°C]	Temperatura máxima media año [°C]
Estación	461,1	628,4	48	23,3	24,6

Fuente: Boletín Climatológico Anual. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

El mes de noviembre del 2011 no fue considerado dentro del análisis de vapor de agua para la estación de RIOP, debido a que no se registraron datos de 14 días, a partir del 9 hasta el 22 de noviembre; sin embargo, para los demás días se registró una temperatura mínima de 8°C, con un índice mínimo de precipitaciones.

4.6 Análisis del Modelamiento Matemático

Las estaciones de monitoreo continuo se ajustaron a un modelo de tendencia lineal, en donde la variable dependiente y es el vapor de agua en cada una de las ecuaciones representadas en las gráficas de la sección 4.5.1 a 4.5.7 y que de igual manera, se detallan en la tabla 4.3.

Para avalar el modelo, se evaluó el coeficiente de autocorrelación de la serie de tiempo mediante la prueba estadística de Durbin – Watson, para determinar la similitud en un mes y otro, como se describe a continuación:

Prueba de Hipótesis

1. *La prueba de hipótesis se planteó para una autocorrelación positiva*

H_0 = Los términos de error no están autocorrelacionados

H_a = Los términos de error están autocorrelacionados positivamente

$\alpha = 0,05$

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2} \quad 4.1$$

Tabla 4.3 Prueba de hipótesis para las estaciones de monitoreo continuo

Estación	Ecuación	n	d	$d_{L.05}$	$d_{U.05}$
CHPI	$y = -63,653(Tiempo) + 12364$	24	0,637	1,27	1,45
CONZ	$y = -18,984(Tiempo) + 5643,6$	24	1,3035	1,27	1,45
ISPA	$y = 69,858(Tiempo) + 9076,3$	24	0,835	1,27	1,45

Estación	Ecuación	n	d	d _{L.05}	d _{U.05}
MDO1	$y = 3,9485(Tiempo) + 4095,5$	24	0,4517	1,27	1,45
OHI2	$y = -34,054(Tiempo) + 2967,9$	21	1,09	1,22	1,42
SCUB	$y = -0,9983(Tiempo) + 15511$	22	0,7422	1,24	1,43
RIOP	$y = -63,653(Tiempo) + 12364$	23	1,14	1,26	1,44

Según la tabla estadística de Durbin – Watson a un 95% de confianza, las estaciones de monitoreo continuo consideradas para el modelamiento matemático, rechazan la hipótesis nula al tener un valor de $d < d_{L.05}$ y demuestran que los términos de error están autocorrelacionados positivamente; a excepción de la estación de CONZ, que obtuvo un valor $d_{L.05} < d < d_{U.05}$ en la prueba de hipótesis, y por ende se realizó una segunda prueba:

2. La prueba de hipótesis se planteó para una autocorrelación negativa

H_0 = Los términos de error no están autocorrelacionados

H_a = Los términos de error están autocorrelacionados negativamente

$\alpha = 0,05$

$$d = U - \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2} = 2,696$$

Se utilizan los mismos valores $d_{L.05}=1,27$ y $d_{U.05}=1,45$; por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula al tener un valor $(U - d) > 1,45$, es decir los términos de error no están autocorrelacionados.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- ✓ La aplicación de la herramienta *metutil* del software científico Gamit – Globk generó datos confiables en la determinación de los parámetros atmosféricos, principalmente en el cálculo de vapor de agua para las estaciones de CHPI, CONZ, ISPA, MDO1, OHI2, SCUB y RIOP, siendo de gran utilidad para el monitoreo continuo de la variación de estos parámetros en estaciones GPS.
- ✓ El modelo atmosférico GPT utilizado para el cálculo de vapor de agua en la estación de monitoreo continuo RIOP por no poseer una estación meteorológica, obtuvo un 94% de confiabilidad en los parámetros estimados, luego de haber comparado en las estaciones de ISPA y CONZ.
- ✓ Al ajustar a las estaciones de monitoreo continuo a un modelo de regresión lineal, fue necesario el analizar la consistencia de la relación de la variable de vapor de agua, y mediante la prueba de hipótesis Durbin – Watson se determinó que la tendencia para cada uno de los meses se asemeja en uno y otro año; a excepción de la estación de monitoreo continuo CONZ que tiene una tendencia aleatoria en el tiempo.

5.2. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda especificar los modelos o variables apropiados que se vayan a utilizar, en la tabla *sestbl.* del software Gamit – Globk para la determinación de los parámetros atmosféricos, acordes al alcance del proyecto se fuese a realizar.
- ✓ Validar los datos de vapor de agua para la estación de monitoreo continuo RIOP, con equipos como los radiómetros o radiosondas que estén cercanos a la estación y que monitoreen continuamente en un tiempo determinado.
- ✓ Se recomienda utilizar otros modelos de análisis para series de tiempo que avalen el ajuste tendencial lineal realizado para las estaciones de monitoreo continuo CHPI, CONZ, ISPA, MDO1, OHI2, SCUB y RIOP.
- ✓ Es recomendable considerar el tipo de tendencia de la serie de vapor de agua u otro parámetro atmosférico que esté en función del tiempo, ya que al igual que la serie de tiempo obtenida para la estación de monitoreo continuo de Concepción puede ser aleatoria y tener otro tipo de análisis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceituno, Patricio, Boletín climático, Vínculo Web: <http://met.dgf.uchile.cl/clima/>, diciembre 2012, enero 1013.
- Awange, Joseph, *Environmental Monitoring Using GNSS: Global Navigation Satellite Systems*, 1, Springer, Londres 2012.
- Berg, Hellmut, “Allgemeine Meteorologie”, *Dümmler Verlag Bonn*, 76, 1-114, Alemania 1948.
- Bevis, Michael, Businger, Herring, Roken, Anthes & Ware, “GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, Pág. 15,787-15,801, Octubre 1992.
- Boehm, Johannes, Werl, Birgit & Schuh, Harald, “Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data”, *Journal of Geophysical Research*, 111, 1-22, 2006.
- Boehm, Johannes, Niell, A., Tregoning, P. & Schuh, Harald, “Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data”, *Geophysical Research Letters*, 33, 1-4, 2006.
- Boehm, Johannes, Heinkelmann, Robert & Schuh, Harald, “A Global Model of Pressure and Temperature for Geodetic Applications”, *Journal of Geodesy*, 81, 679-683, 2007.
- Bowerman, Bruce & Oconnell, Richard, *Pronósticos, Series de Tiempo y Regresión: Un enfoque aplicado*, 4ª. Ed, Cengage Learning Brooks Cole, Mexico 2007.
- Cioce, V., Hoyer, M., Wildermann, E., Royero, G., Espinosa, R. & Méndez, T., “Aprovechamiento de la infraestructura observacional SIRGAS-CON en Venezuela para el seguimiento del vapor de agua troposférico”, *Reunión SIRGAS 2010*, Perú 2010.
- Córdova, Hildegardo, *Naturaleza y sociedad: Una introducción a la Geografía*, 1, Primera edición, Fondo editorial, Lima 2002.

Elgered, G., Davis, Jim, Herring, Thomas & Saphiro, I., “Geodesy by Radio Interferometry Water Vapor Radiometry for Estimation of the Wet Delay”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, 6541-6555, Abril 1991.

Emardson, T y Derks, Henrico, “On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water vapour in the European atmosphere”, *Meteorology Applications*, 7, 61 - 68, 2000.

Estey, Louis & Meertens, Charles, “TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS data”, *GPS Solutions*, 3, 42-49, 1999.

Galbiati, Jorge, “Regresión Lineal Simple”, *Apuntes de clase*, Universidad Nacional de Tucumán.

Herring, T., King, R. & McClusky S., “GAMIT Reference Manual”, *GPS Analysis at MIT*, Massachusetts 2010.

Hoffman, John, *Linear Regression Analysis: Applications and Assumptions*, 2a, Stata version, Estados Unidos 2010.

Hoşten, Serkan, Piecewise linear objective functions, Departamento de Matemáticas, Universidad de San Francisco, San Francisco 2003.

Huerta, E., Mangiaterra, A. & Noguera, G., *GPS Posicionamiento Satelital*, 1, Universidad Nacional de Rosario, Argentina 2005.

Karthigesu Nagarajoo, “Improved Ionospheric Correction for Dual Frequency and Differential GPS Positioning Methods”, *The University of Leeds*, Department of Electronic and Electrical Engineering, Octubre 2007, Tesis.

Leica, *Introducción al Sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global)*, 1, Leica Geosystems AG, Suiza 1999.

Niell, A., “Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths”, *Journal of Geophysical Research*, 101, 1-25, 1996.

Niell, A., Coster, A., Solheim, F., Mendes, V., Toor, P., Langley, R. & Upham, C., “Comparison of Measurements of Atmospheric Wet Delay by Radiosonde, Water Vapor Radiometer, GPS, and VLBI”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18, 830-850, 2000.

Perdiguer, R., Zurutuza, J., Ruiz, M. & Sevilla, M., “Estrategias de cálculo del retardo troposférico y su influencia en procesamiento GPS de alta precisión”, 6ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Tomar 2008.

Pilapanta, Christian & Tierra, Alfonso, “Estudio Metodológico sobre la utilización de Funciones de Mapeo Troposférico en el posicionamiento GPS de alta precisión”, VII Congreso Ciencia y Tecnología ESPE 2012, Sangolquí, 2012.

Rey, Jorge, *Nociones de Topografía, Geodesia y Cartografía*, Universidad de Extremadura Servicio, 1999.

Sakidin, H., Rizam, M., Mohamed, A., Salmi, M., Matori, N. & Mohamed, A., “Effect of GPS Tropospheric Delay Niell Mapping Function Simplification”, *Malaysian Journal of Mathematical Sciences*, 3, 95-107, Malaysia 2009.

Sapucci, Luiz, “Estimativa do vapor d’água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS”, *Universidade Estadual Paulista*, 2001.

Sapucci, Luiz & Galera Joao, “Avaliação dos modelos de Hopfield e de Saastamoinen para a modelagem do atraso zenital troposférico em territorio brasileiro utilizando GPS”, *Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas*, Brasil.

Sapucci, Luiz, Machado, L. & Monico J., “Modelagem da temperatura media troposferica no Brasil para quantificacao do IWV utilizando GPS”, *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza 2004.

Seeber, Günter, *Satellite geodesy : foundations, methods, and applications*, 2, Walter de Gruyter, Alemania 2003.

Sevilla M. “Colocación Mínimos Cuadrados”, *IV Concurso de Geodesia Superior*, Madrid 1987.

Stuart, Wilson, “Piecewise Linear Function”, Vínculo Web: <http://mathworld.wolfram.com/PiecewiseLinearFunction.html>, Febrero 2013.

Toll, Mathew & Tubbs, Robert, “Very Long Baseline Interferometry (VLBI) as a means of sensing water vapour”, MetOffice Forecasting Research and Development, 543, Reino Unido.

Viteri, Andrea & Tierra, Alfonso, “Control de calidad de archivos RINEX con TEQC”, VII Congreso de Ciencia y tecnología ESPE, Sangolquí 2012.