



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS CONDICIONES
AMBIENTALES EN LAS PROPIEDADES MODALES
DE UN EDIFICIO DE HORMIGÓN ARMADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JULIO ANDRÉS BASOALTO ALBORNOZ

PROFESOR GUÍA:
RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PATRICIO BONELLI CANABES
RENÉ LAGOS CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE
2013

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Julio Andrés Basoalto Albornoz
FECHA: 30/10/2013
PROFESOR GUÍA: Sr. Rubén Boroschek Krauskopf**

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES EN LAS
PROPIEDADES MODALES DE UN EDIFICIO DE HORMIGÓN ARMADO**

En la variación en el tiempo de las propiedades modales de una estructura está la degradación de la rigidez debido a daño y otros efectos, entre los cuales se cuenta la variación de las condiciones climáticas.

En este trabajo se miden las características modales de un edificio de hormigón armado ubicado en Santiago desde marzo de 2009 hasta diciembre de 2011, la Torre Central de la FCFM de la U. de Chile cuenta desde inicios de 2009 con una red de monitoreo continuo, que permite obtener registros de microvibraciones en 3 niveles del edificio cada 15 minutos.

Los registros de microvibraciones se procesan para obtener las propiedades modales del edificio (frecuencias, amortiguamientos y formas modales). En el presente trabajo se ha analizado la influencia de las condiciones ambientales en la variación de las 3 primeras frecuencias modales.

Con los registros de aceleraciones se pudo analizar el efecto del sismo de 27 de febrero de 2010 a fin de compararlo con el efecto en las propiedades modales de los factores ambientales, tales como temperatura, saturación del suelo, humedad entre otros.

Las condiciones ambientales que más se relacionan con la variación de las frecuencias son la temperatura del aire y la presión atmosférica, además de la saturación del suelo a 10m de profundidad.

La disminución promedio del valor de las 3 primeras frecuencias modales debido al terremoto del 27 de febrero de 2010 fue de un 11,4% mientras que las variaciones debido a las condiciones ambientales son inferiores al 5%.

Agradecimientos:

Quiero agradecer a quienes me han apoyado de distintas maneras y desinteresadamente en este largo camino, entre ellos profesores, compañeros, funcionarios de la facultad, amigos y familiares.

Especialmente agradezco a los profesores Rubén Boroschek, David Campusano y Pedro Soto, a Tomás Núñez, Rodrigo Carreño, José Caroca y Álvaro Torrent.

A mi familia y a una larga lista de amigos que me apoyaron en todo momento, dándome ánimo y compartiendo hermosos momentos.

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos.....	1
1.2. Metodología.....	2
1.3. Alcances de cada Capítulo.....	3
2. Marco Teórico	4
2.1. Métodos de obtención de las propiedades modales	4
2.2. Descripción del proceso estadístico.....	4
3. Características del edificio e instrumentación	7
3.1. Características generales.....	7
3.2. Estructuración	8
3.3. Instrumentación	10
4. Análisis de los datos	12
4.1. Adquisición de datos.....	12
4.2. Descripción estadística de las variables.....	28
4.3. Variación de las propiedades modales a consecuencia del sismo del 27F	46
4.4. Análisis de los datos previos al sismo del 27F	47
4.5. Análisis de los datos posteriores al sismo del 27F.....	58
5. Conclusiones y comentarios finales	68
6. Bibliografía y referencias	70

1. INTRODUCCION

El considerar la reducción de las frecuencias modales como un indicador de daño estructural es habitual, sin embargo se han observado variaciones estacionales en los parámetros dinámicos sin que exista evidencia de deterioro estructural.

En un estudio publicado en 2006 ([6] Clinton) se observó en dos edificios de hormigón armado, de tres y nueve plantas, que la variación estacional de las propiedades modales estaba correlacionada con factores ambientales como el viento, la lluvia y la temperatura mientras que no hubo evidencia de daño estructural.

A fin de estudiar y aislar este efecto en el edificio Torre Central de la FCFM de la U. de Chile, se han instalado sensores de micro vibraciones en los pisos 3, 5 y 8, además de sensores de humedad del suelo en profundidades de: 5, 10 y 20 metros. Para este estudio se cuenta con registros de aceleraciones desde marzo del 2009, los cuales están siendo almacenados de forma constante en una base de datos. En la página web: www.ingcivil.uchile.cl/shm se puede ver la progresión de las tres primeras frecuencias durante los últimos meses.

Con este estudio se busca definir la influencia de las variables ambientales en el comportamiento dinámico del edificio, de esta forma se podrá estimar con mayor precisión el daño estructural.

1.1. OBJETIVOS

Objetivo general: Analizar mediante métodos estadísticos los registros de vibraciones de la Torre Central y de las condiciones ambientales a fin de obtener correlaciones entre estas y los parámetros modales del edificio.

Objetivos específicos:

- Determinar la variación de las propiedades modales
- Aislar el efecto de cada variable ambiental disponible sobre las propiedades modales.
- Comparar la variación de las propiedades modales debido a las condiciones ambientales y debido al daño estructural inducido por sismos.

1.2. METODOLOGIA

La metodología consiste en:

- Recopilar y/o desarrollar la información necesaria del edificio en estudio: planos, modelos computacionales.
- Recopilar los registros de vibraciones del edificio y de las condiciones ambientales del período entre marzo del 2009 y diciembre del 2011.
- Corregir y optimizar rutina MATLAB que obtiene las propiedades modales mediante el método PSD.
- Procesar los registros de aceleraciones para obtener las propiedades modales mediante los métodos PSD y SSI.
- Separar los datos de antes y después del 27 de febrero de 2010.
- Descripción estadística de cada variable.
- Análisis mediante un modelo estadístico de regresión múltiple con análisis de residuos para obtener la correlación entre cada variable ambiental con las propiedades modales de los edificios.
- Obtener la variación de las propiedades modales del edificio debido al sismo del 27 de febrero de 2010.
- Comparar el deterioro observado debido al sismo con la variación provocada por las variables ambientales.

1.3. ALCANCES DE CADA CAPÍTULO

- Capítulo 1: Introducción.

Visión general del trabajo a realizar y presentación de los objetivos y alcances.

- Capítulo 2: Marco teórico.

Descripción breve de los métodos a utilizar:

- Espectro de Densidad de Potencia (PSD)
- Método del Sub-Espacio Estocástico (SSI)
- Modelo de regresión lineal para múltiples variables independientes.
- Análisis de residuos de la regresión lineal.

- Capítulo 3: Descripción del edificio.

Se reúne información importante relativa al edificio estudiado: planos, modelos computacionales y ubicación de acelerómetros, si no se encuentra disponible alguno de estos datos se desarrollarán los planos o modelos computacionales necesarios.

- Capítulo 4: Análisis de datos.

Recopilación y procesamiento de los datos dinámicos y ambientales.

Se efectúa el análisis estadístico de las variables antes y después del terremoto del 27 de febrero de 2010 y se obtienen los resultados de correlaciones y daño de la estructura debido al terremoto.

- Capítulo 5: Conclusiones y comentarios finales.

Comentarios finales, evaluando los resultados del análisis estadístico.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES MODALES

Para obtener las propiedades modales a partir de un registro de microvibraciones se usan dos métodos de identificación: PSD¹ y SSI².

Ambos métodos pueden aplicarse de forma independiente en la determinación de las propiedades modales, pues actúan en espacios distintos, PSD en el dominio de las frecuencias y SSI en el dominio del tiempo.

En el presente estudio se utilizan ambos métodos para obtener las frecuencias en cada uno de los registros de que se dispone, pero solo se obtienen los amortiguamientos y las formas modales mediante el método SSI debido a su mayor exactitud en la obtención de estos valores.

En general se obtienen los mismos valores de frecuencias en ambos métodos, siendo el método SSI el más preciso y con mejor resolución, por lo tanto el proceso estadístico de correlacionar las propiedades modales con las condiciones ambientales se realiza con los valores obtenidos mediante el método SSI.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO ESTADÍSTICO

Se analiza la correlación entre las variables mediante modelos lineales, para una y para múltiples variables independientes, donde las variables dependientes son las propiedades modales y las independientes las condiciones ambientales.

Para el caso en que se estudia la correlación entre una variable dinámica y una variable ambiental se realiza una regresión lineal simple, donde el indicador R^2 es el estimador del nivel de confianza del resultado obtenido.

¹ PSD: *Power Spectrum Density*, para una descripción detallada del método consultar [2] Núñez, pág. 136

² SSI: *Stochastic Subspace Identification*, para una descripción detallada del método, consultar [6] Caroca, pág. 37

2.2.1. Modelo de regresión lineal para múltiples variables independientes

La forma más general de un modelo lineal de regresión múltiple es la siguiente³:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{i1} + \beta_2 \cdot x_{i2} + \dots + \beta_k \cdot x_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

donde:

y_i : Variable dinámica en el tiempo i (frecuencia o amortiguamiento modal)

x_{ik} : Variable ambiental k en el tiempo i

β_k : Constante de proporcionalidad asociada a variable ambiental k

ε_i : Error asociado a la observación i

El modelo de regresión múltiple puede escribirse en forma matricial de la siguiente manera:

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (2)$$

donde:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}; \quad \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_k \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix}; \quad y \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}$$

De (2) se tiene que:

$$\varepsilon = Y - X \cdot \beta \quad (3)$$

Al pre multiplicar por el traspuesto en cada lado de la ecuación se obtiene:

$$\varepsilon' \cdot \varepsilon = (Y - X \cdot \beta)' \cdot (Y - X \cdot \beta) \quad (4)$$

La ecuación (4) debe minimizarse con respecto a β , gráficamente esto es buscar la línea que se acerca más a los datos (método de mínimos cuadrados MMC).

Si se denomina $\hat{\beta}$ a la estimación de β , entonces:

$$\hat{\beta} = (X' \cdot X)^{-1} \cdot X' \cdot Y \quad (5)$$

³ Para una descripción más detallada del análisis multivariable consultar [12] Greene, pág. 339

El estadístico R^2 indica que porcentaje de la variación de Y es explicado por el modelo. Se define como 1 menos la razón entre la suma de cuadrados explicados (SCE) y la suma de cuadrados totales (SCT):

$$R^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT} \quad (6)$$

donde:

$$SCE = (Y - \hat{Y})^t \cdot (Y - \hat{Y}) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

y

$$SCT = (Y - \bar{y} \cdot I)^t \cdot (Y - \bar{y} \cdot I) = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (8)$$

siendo \hat{Y} la estimación de Y .

El valor de R^2 varía entre 0 (ajuste nulo) y 1 (ajuste perfecto). Tiene como desventaja que siempre aumenta cuando se le agregan variables independientes o explicativas. Por eso suele usarse en lugar de R^2 un R^2 ajustado \bar{R}^2 , donde:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k} \cdot (1 - R^2) \quad (9)$$

En (9), el cociente entre $\frac{n-1}{n-k}$ será igual a 1 cuando n es muy grande, por lo que $\bar{R}^2 = R^2$. Cabe notar que se está trabajando con una cantidad de datos n del orden de decenas de miles mientras que el valor de k no llega a 10, por lo tanto en el presente estudio no se utiliza este valor ajustado.

Antes de realizar este proceso multivariable debe analizarse la correlación individual entre todas las variables dinámicas y ambientales, y ambientales entre ellas.

Si el valor de R^2 entre una variable dinámica y una ambiental es muy baja ($<0,30$), no se considera dicha variable ambiental en el análisis multivariable de la variable dinámica en cuestión.

Si el valor de R^2 entre dos variables ambientales es muy alta ($>0,60$), solo es necesario incluir una de estas en el análisis multivariable, la de mejor correlación con cada variable dinámica.

3. CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO E INSTRUMENTACIÓN

3.1. Características Generales

La Torre central está ubicada en Beauchef 850, en dependencias de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad del Chile, en la ciudad de Santiago.

Tiene una altura de 30,2m desde el nivel del suelo y está construido en 9 niveles más 2 subterráneos.

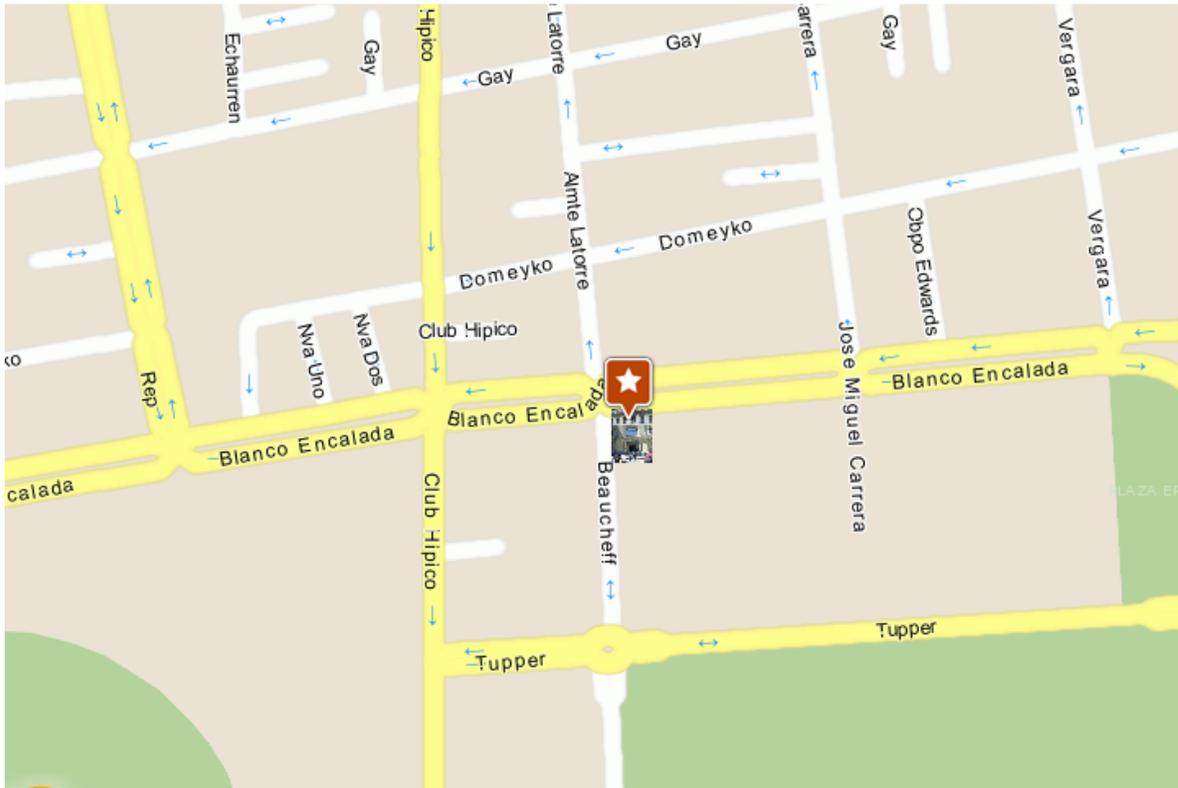


Figura 1: Ubicación de la Torre Central

3.2. Estructuración

El edificio está estructurado en base a muros de hormigón armado, de 35 cm de espesor típico. Cubre un área en planta de 30 x 19 m². La losa de cada piso tiene 25cm de espesor. El suelo de fundación es grava densa, y corresponde a un suelo tipo II de la normativa chilena.

Las figuras 2 a 5 muestran las elevaciones de las cuatro fachadas del edificio.



Figura 2: Elevación Norte



Figura 3: Elevación Poniente



Figura 4: Elevación Sur



Figura 5: Elevación Oriente

En las figuras 6 y 7 puede verse la distribución de los muros de las dos distintas plantas del edificio.

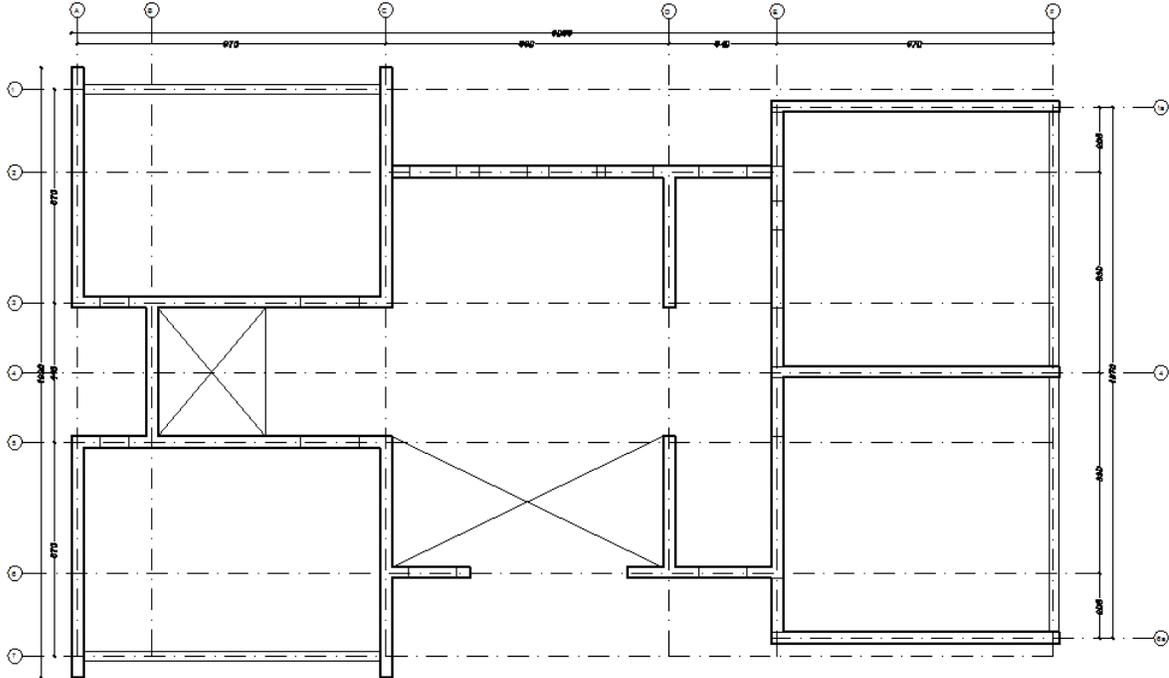


Figura 6: Planta típica

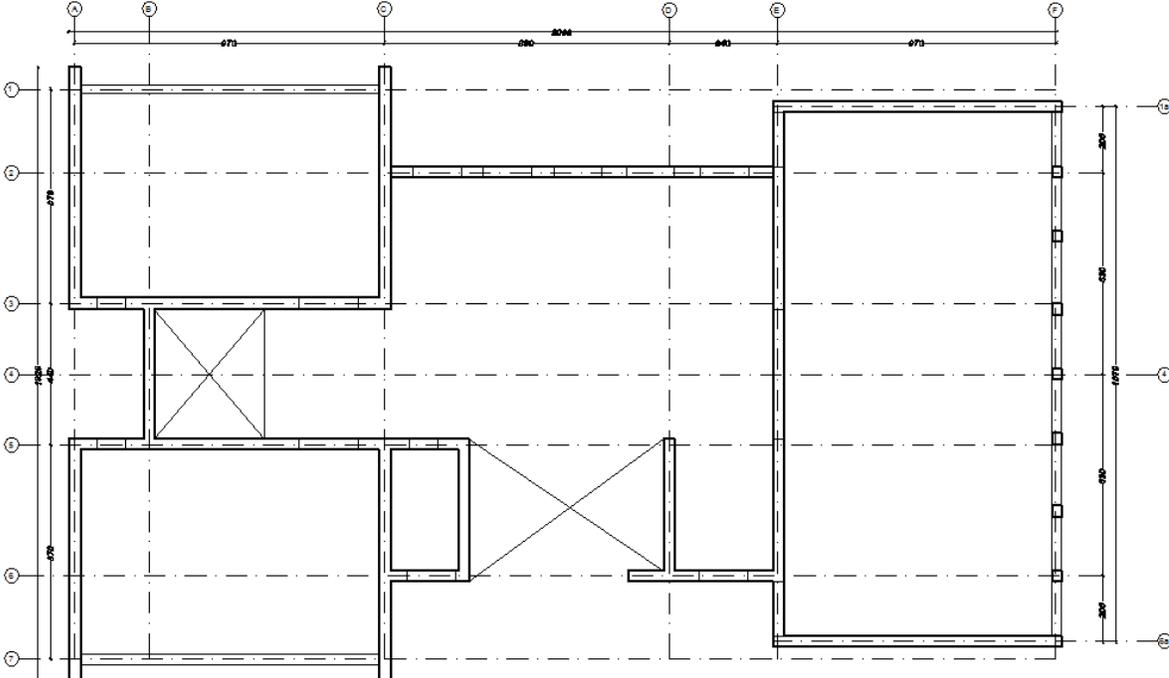


Figura 7: Planta pisos 7 y 8.

3.3. Instrumentación

El edificio está siendo monitoreado constantemente con 8 sensores de micro vibraciones ubicados en los pisos 3, 8 y 1^{er} subterráneo. Se utilizan acelerómetros Kinemetrics EpiSensor ES-U2 configurados en un rango de 0.25g fijados a la losa o antepecho correspondiente mediante placas de aluminio ancladas con pernos.

La adquisición de datos se realiza a través de un sistema de conversión que transforma la señal análoga de los acelerómetros en una digital, la que es adquirida por un computador dedicado exclusivamente al proceso de adquisición y procesamiento de los datos.

El convertidor análogo-digital se compone de dos tarjetas lotech DBK y un convertidor lotech Daqbook 200. Las tarjetas se configuran con una ganancia de 10X.

La frecuencia de muestreo del proceso es de 200 muestras por segundo y se guardan registros de 15 minutos de duración de forma continua.

La ubicación de los sensores se muestra a continuación:

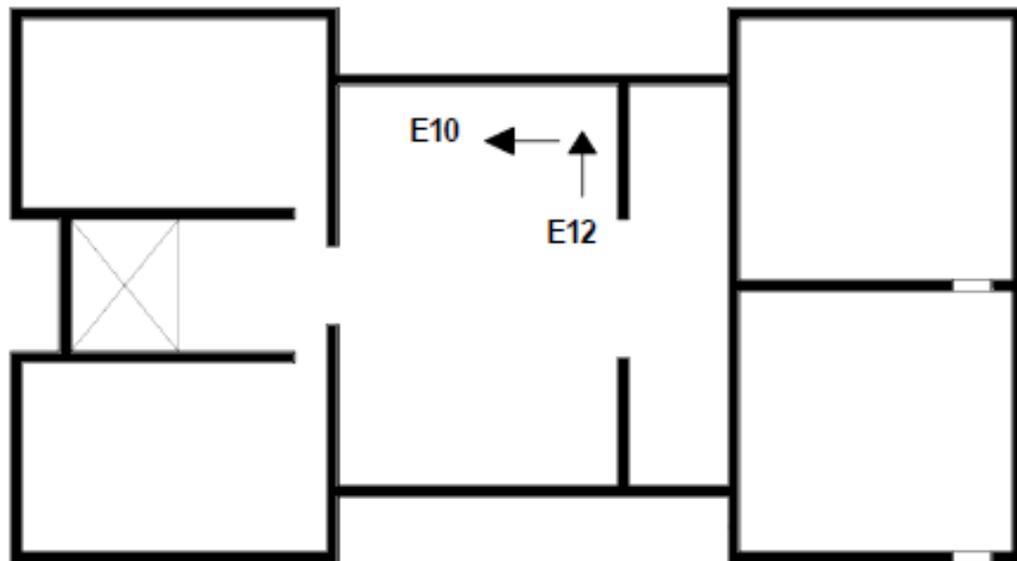


Figura 8: Ubicación de sensores en subterráneo de Torre Central⁴

⁴ Fuente: [4] Yáñez, pág.34

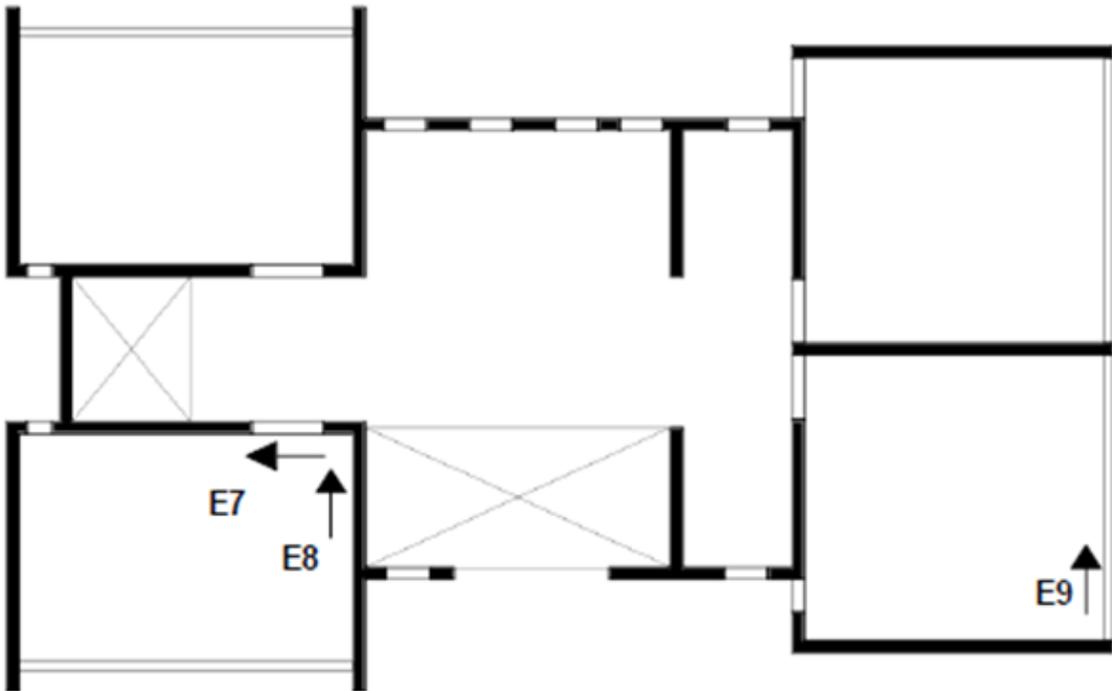


Figura 9: Ubicación de sensores en 3^{er} piso de Torre Central⁵

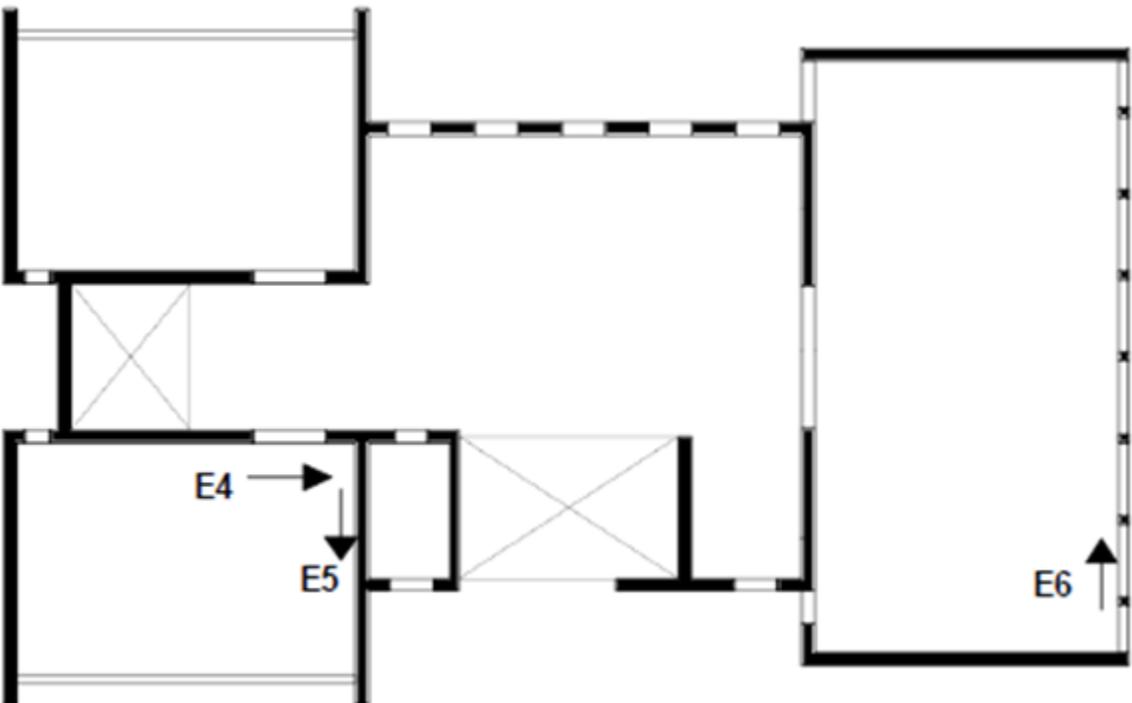


Figura 10: Ubicación de sensores en 8^{vo} piso de Torre Central⁶

⁵ Fuente: [4] Yáñez, pág.33

⁶ Fuente: [4] Yáñez, pág.33

4. ANALISIS DE LOS DATOS

4.1. ADQUISICION DE DATOS

4.1.1. Datos dinámicos

Cada registro de 15 min es procesado de forma automática para obtener las frecuencias de los tres primeros modos de la estructura mediante los métodos PSD y SSI, este proceso automático se ha estado realizando con rutinas antiguas poco eficientes en términos de tiempo de procesador (SSI) y resolución de los resultados (PSD). Los resultados obtenidos con estas rutinas se publican de forma automática en la página: www.ingcivil.uchile.cl/shm.

A fin de mejorar la resolución de los valores obtenidos mediante rutina PSD se ha desarrollado un algoritmo que busca dentro del periodograma los peaks dentro de un rango de frecuencias y que descarta de forma automática los sensores que arrojan valores erróneos.

Los cambios respecto a la rutina anterior son:

- Largo de la ventana de hanning se duplica, pasa de 60 a 120 seg.
- Valor de frecuencia modal es promedio de todos los canales que cumplen con las siguientes condiciones:
 - La frecuencia modal no coincide con el inicio del intervalo de búsqueda.
 - La frecuencia modal no coincide con el final del intervalo de búsqueda.
 - La frecuencia modal no se aleja más de una desviación estándar del promedio de las demás.
 - La amplitud de la potencia de la frecuencia es 5 veces mayor que en los extremos del intervalo de búsqueda.

Con las modificaciones propuestas la resolución mejora en los tres primeros modos que se han considerado desde el inicio del proceso de monitoreo.

Aunque los métodos PSD y SSI pueden aplicarse de forma independiente, se aprovecha el filtro de canales erróneos efectuado en el proceso PSD para entregar como inputs al proceso SSI solo los canales con un registro sano.

Las siguientes figuras muestran una comparación entre las rutinas antiguas y la nueva rutina PSD.

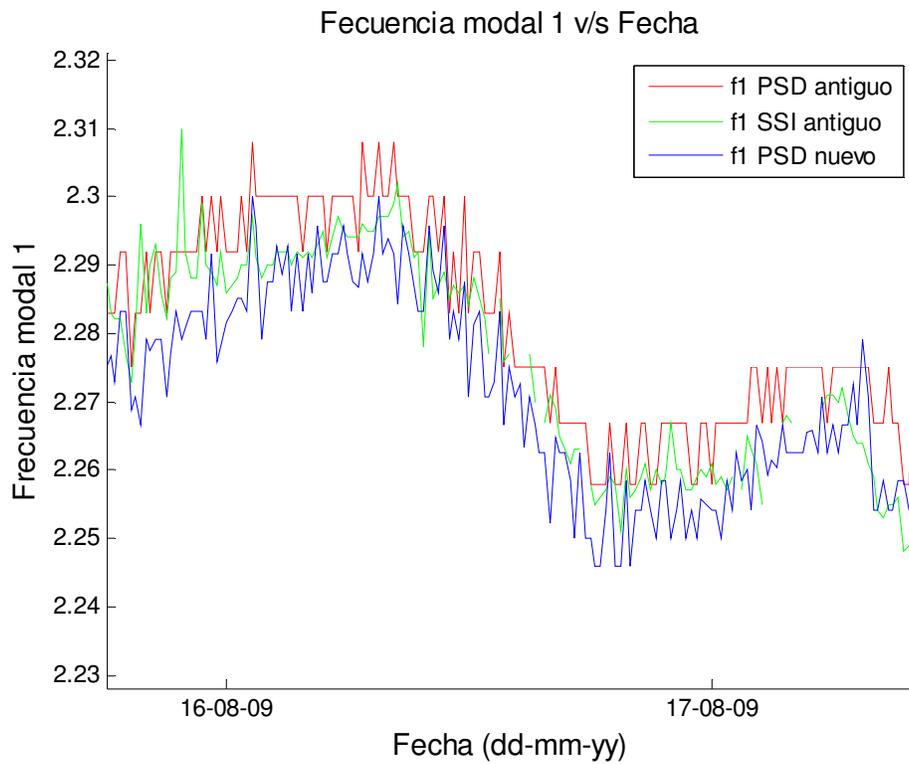


Figura 11: Comparación de series de tiempo para frecuencia modal 1

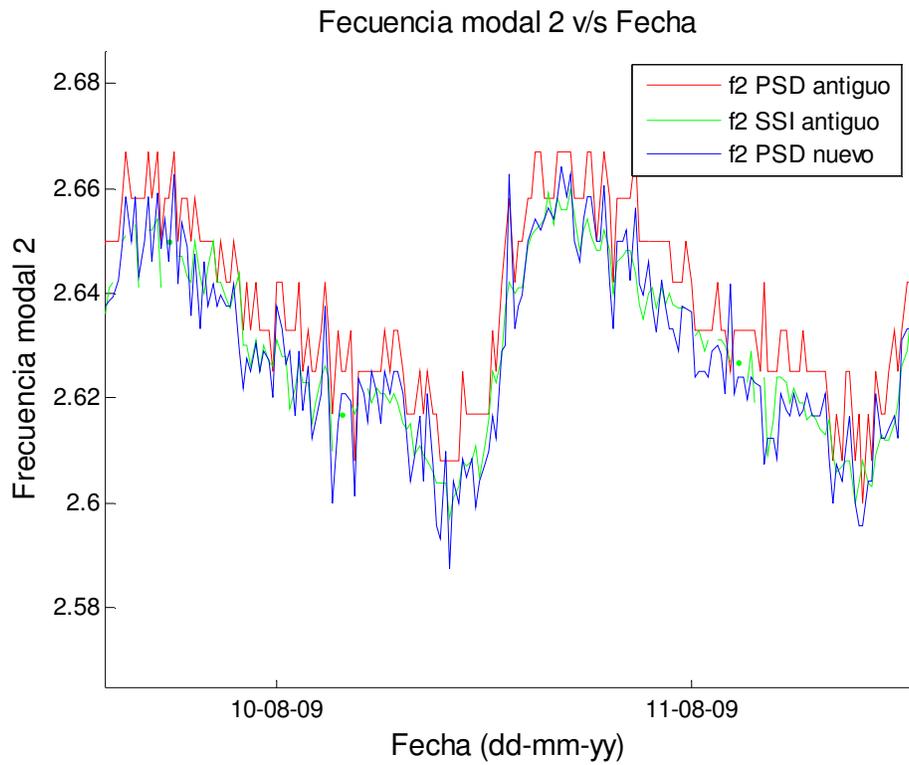


Figura 12: Comparación de series de tiempo para frecuencia modal 2

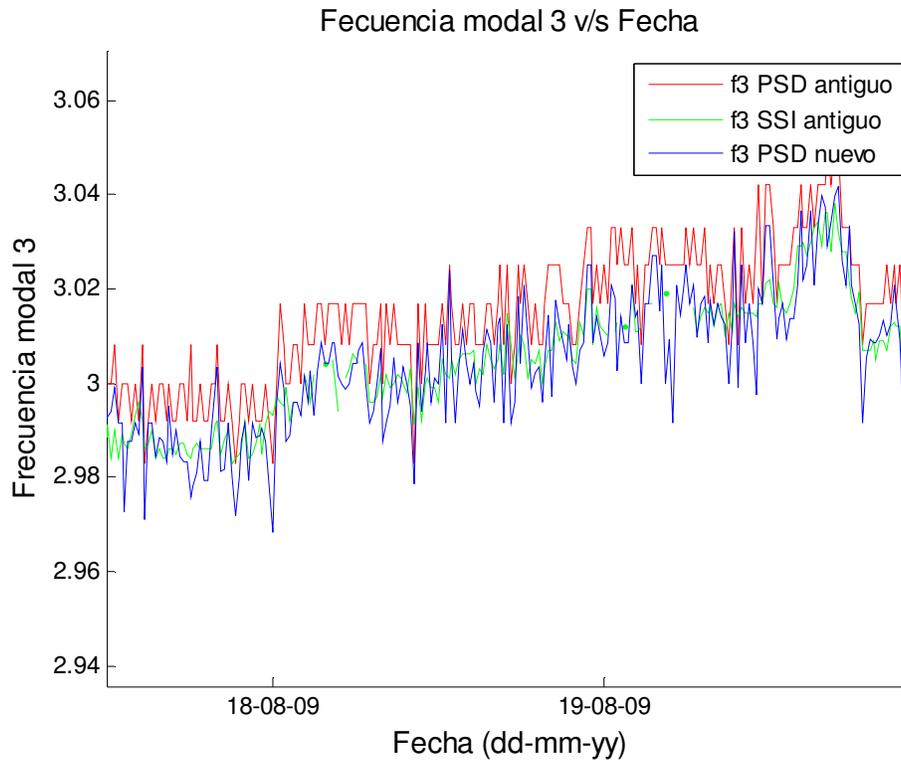


Figura 13: Comparación de series de tiempo para frecuencia modal 3

De la comparación de estas tres rutinas se puede apreciar que el valor de las frecuencias calculadas según rutina PSD antigua está obligada a tomar ciertos valores, lo que da como resultado un diagrama con valores discretos, este salto en los valores es de 0.0083 Hz. Las rutinas SSI y PSD nueva no tienen este problema, y al permitir valores intermedios se obtiene una distribución continua y resultados más precisos.

Además se observa que se obtienen valores similares entre la nueva rutina PSD y la rutina SSI.

A fin de evitar datos erróneos debido a sismos e interpolar valores de frecuencias no calculados debido a registros de vibraciones de mala calidad, la serie de tiempo del proceso con la nueva rutina PSD es filtrada.

El valor del registro i -ésimo es el promedio de los cinco valores entre $i-2$ e $i+2$.

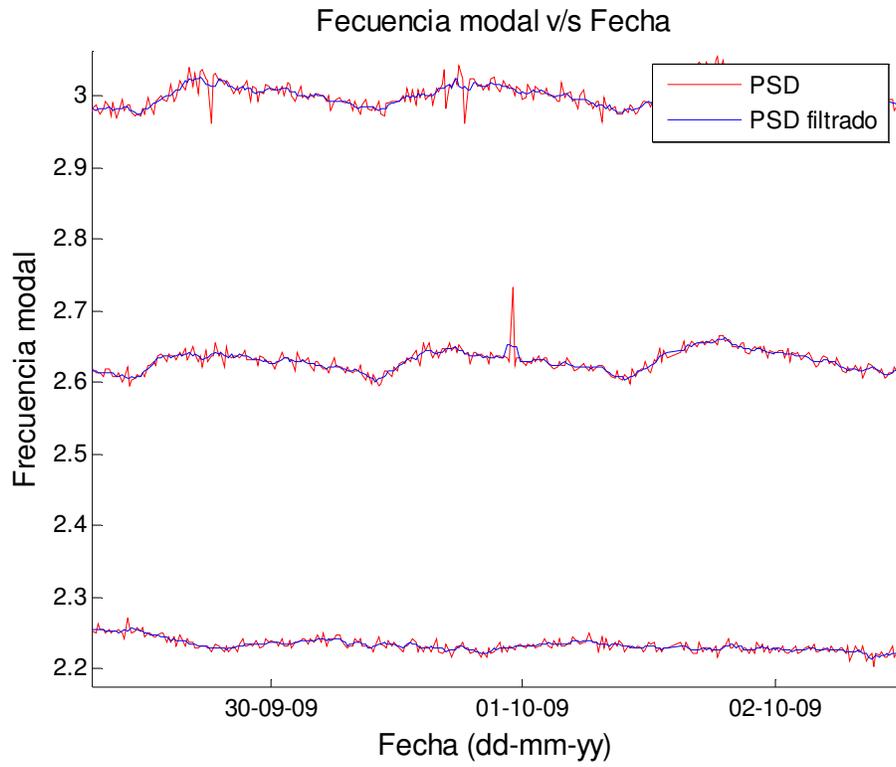


Figura 14: Filtro de registros, antes del 27F

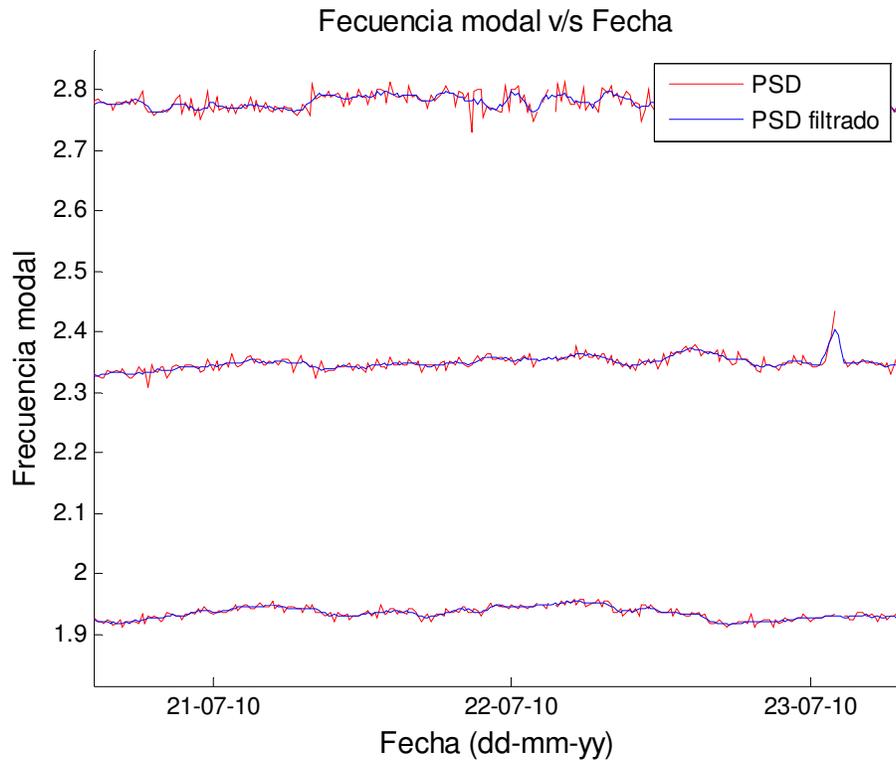


Figura 15: Filtro de registros, después del 27F

Para verificar que los datos filtrados siguen siendo representativos en términos estadísticos, se analizan los histogramas para cada frecuencia en los casos antes y después del 27F de las figuras 16 a 21 y la tabla I que resume la descripción estadística de cada variable. En los histogramas se superponen las curvas de los datos disponibles del proceso SSI antiguo, en general, la cantidad de datos disponibles de este proceso es menor que la del nuevo proceso PSD, que por construcción garantiza una mayor cantidad de datos.

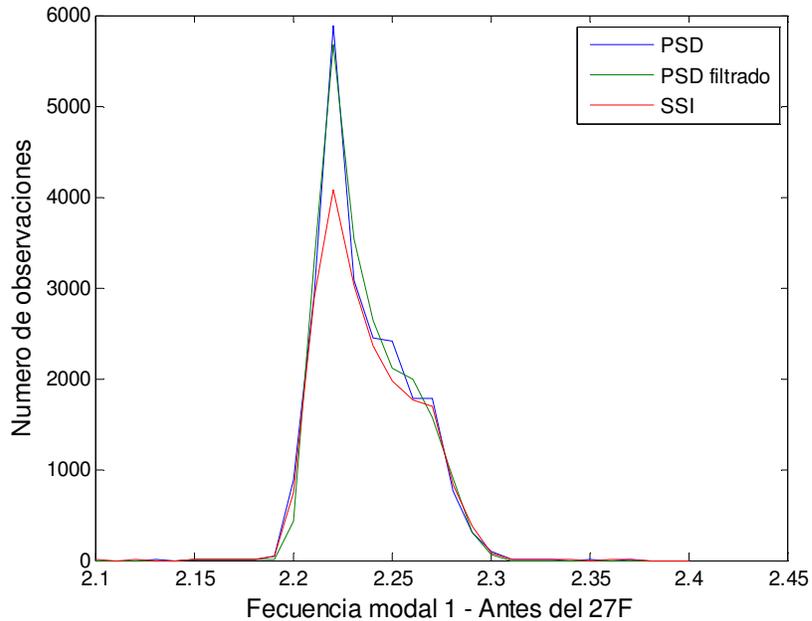


Figura 16: Comparación histogramas frecuencia modal 1, antes del 27F

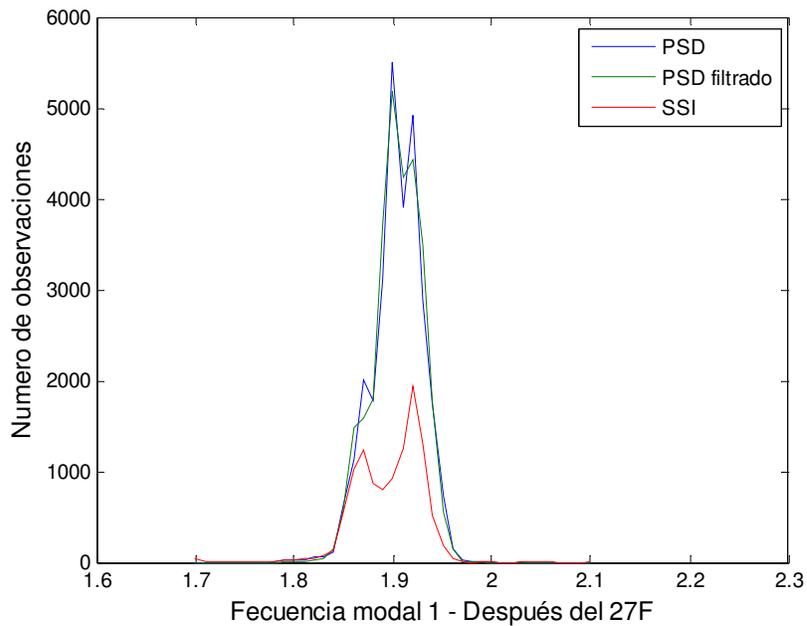


Figura 17: Comparación histogramas frecuencia modal 1, después del 27F

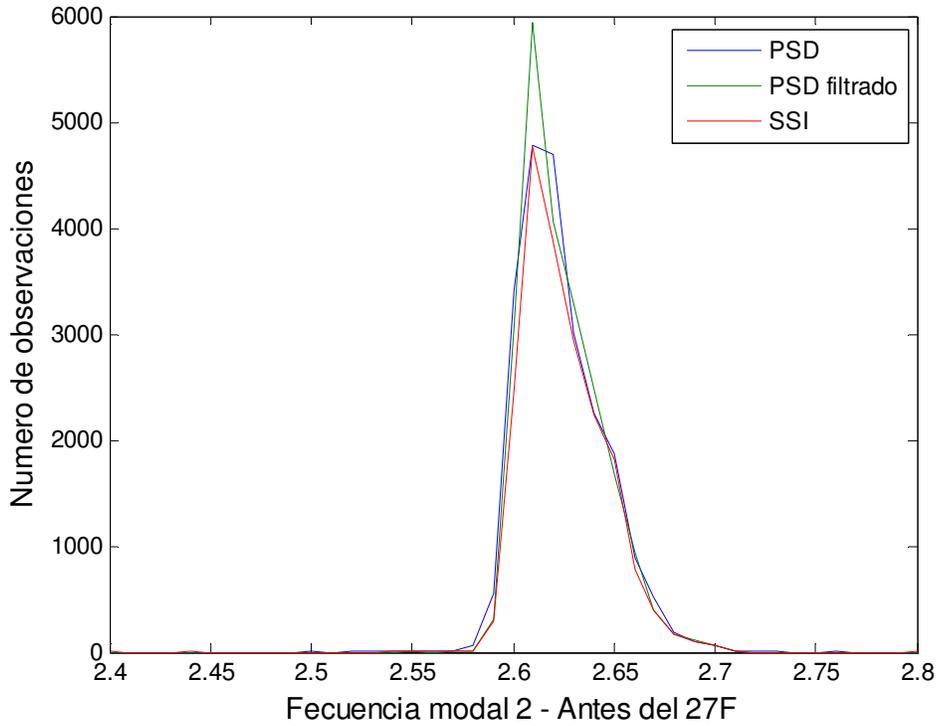


Figura 18: Comparación histogramas frecuencia modal 2, antes del 27F

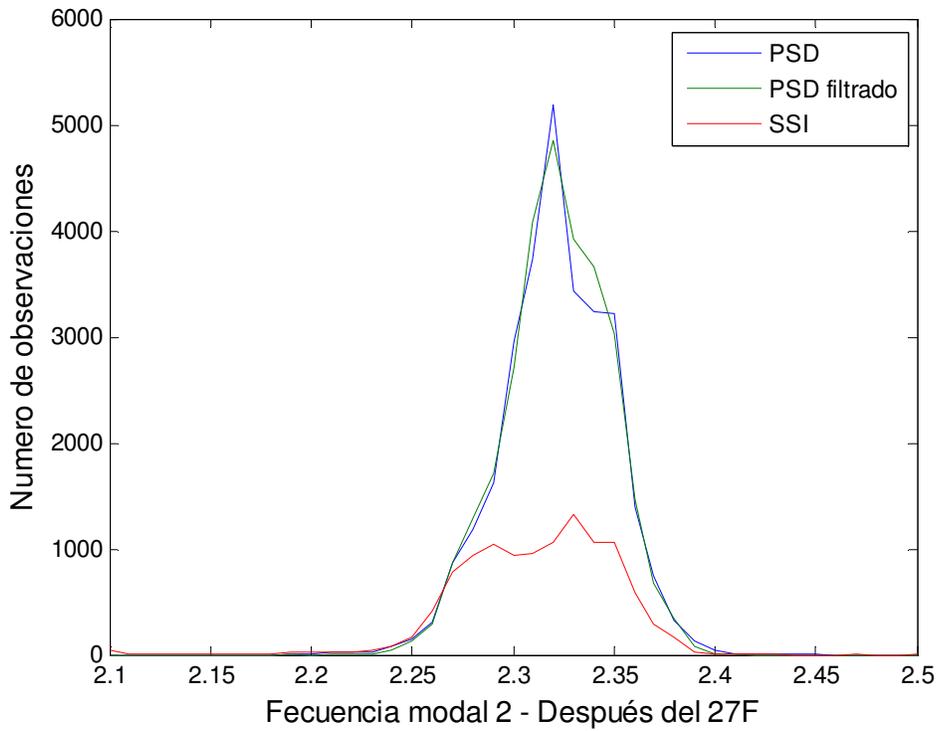


Figura 19: Comparación histogramas frecuencia modal 2, después del 27F

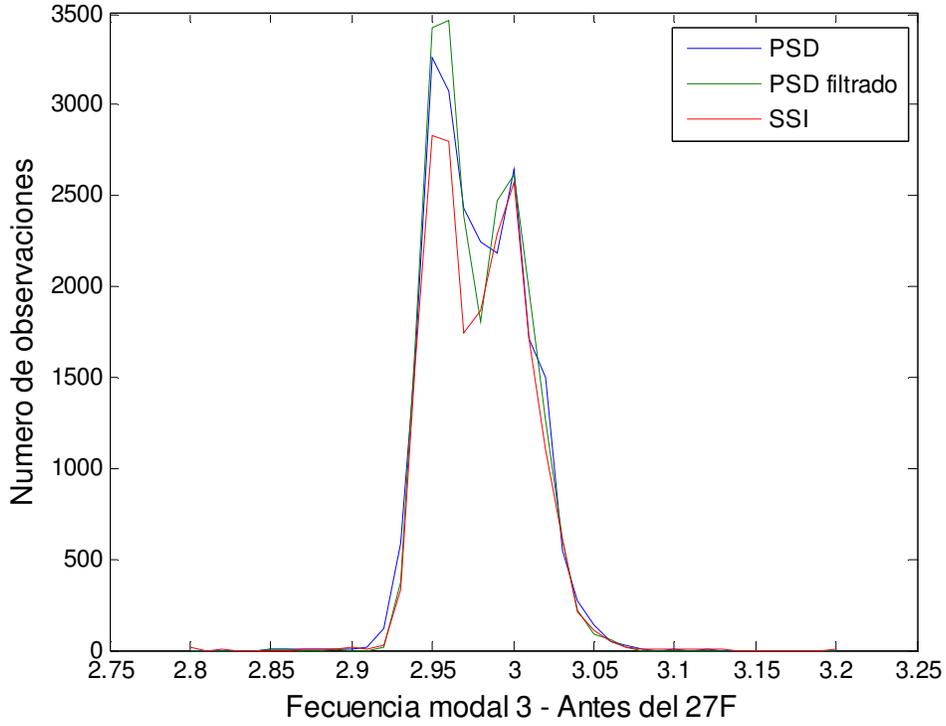


Figura 20: Comparación histogramas frecuencia modal 3, antes del 27F

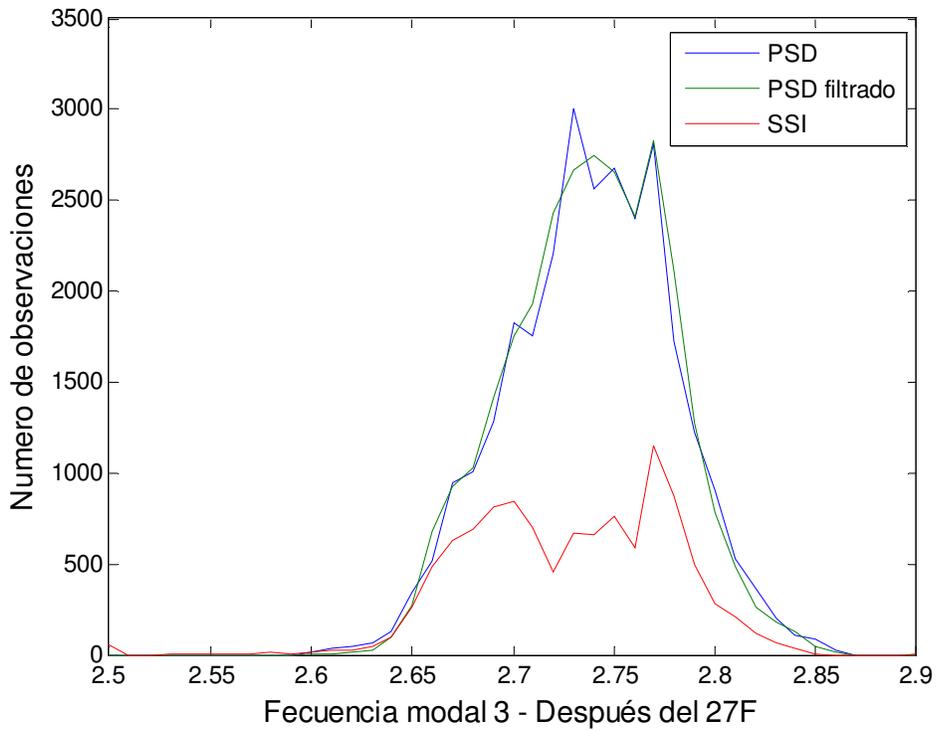


Figura 21: Comparación histogramas frecuencia modal 3, después del 27F

En la tabla siguiente se aprecia como las propiedades estadísticas no se ven alteradas por el filtro usado.

PRE 27F		PSD			PSD Filtrado		
		f1	f2	f3	f1	f2	f3
	Promedio	2,236	2,624	2,978	2,235	2,624	2,978
	Mínimo	2,133	2,500	2,854	2,155	2,552	2,854
	Máximo	2,367	2,758	3,117	2,303	2,708	3,072
	Mediana	2,229	2,621	2,975	2,230	2,620	2,974
	Moda	2,217	2,613	2,954	2,216	2,612	2,950
	Desv. Est.	0,022	0,021	0,028	0,022	0,019	0,027
	Varianza	4,99E-04	4,26E-04	7,98E-04	4,68E-04	3,78E-04	7,39E-04

POST 27F		PSD			PSD Filtrado		
		f1	f2	f3	f1	f2	f3
	Promedio	1,913	2,326	2,741	1,913	2,326	2,741
	Mínimo	1,779	2,192	2,604	1,783	2,197	2,630
	Máximo	2,039	2,454	2,867	1,992	2,450	2,867
	Mediana	1,913	2,324	2,739	1,912	2,323	2,739
	Moda	1,904	2,321	2,729	1,901	2,319	2,745
	Desv. Est.	0,019	0,022	0,034	0,018	0,020	0,033
	Varianza	3,45E-04	4,67E-04	1,16E-03	3,12E-04	4,02E-04	1,07E-03

Tabla I: Resumen propiedades estadísticas, frecuencias modales 1- 3, antes y después del 27F

Salvo la diferencia obvia entre los valores mínimos y máximos de los datos con y sin filtro, se observa que la descripción estadística en cada frecuencia es básicamente la misma entre ambos conjuntos de datos, mejorando levemente la desviación para los datos filtrados.

A continuación se resume la correlación entre valores de frecuencias PSD y PSD filtrados:

PRE27F:

- f1 : 0,97
- f2 : 0,94
- f3 : 0,95

POST27F:

- f1 : 0,95
- f2 : 0,91
- f3 : 0,96

Las figuras 22 y 23 muestran un resumen de la dispersión de las frecuencias 1 a 3 mediante el algoritmo PSD filtrado, y la serie de tiempo completa entre junio de 2009 y diciembre de 2011. Cada barra incluye el número de observaciones en un ancho de 0,005 Hz.

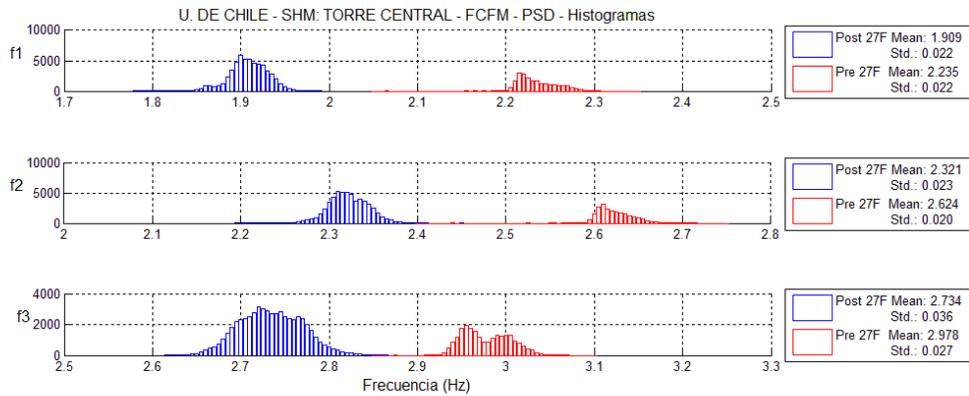


Figura 22: Histogramas frecuencias modales 1- 3, antes y después del 27F, PSD

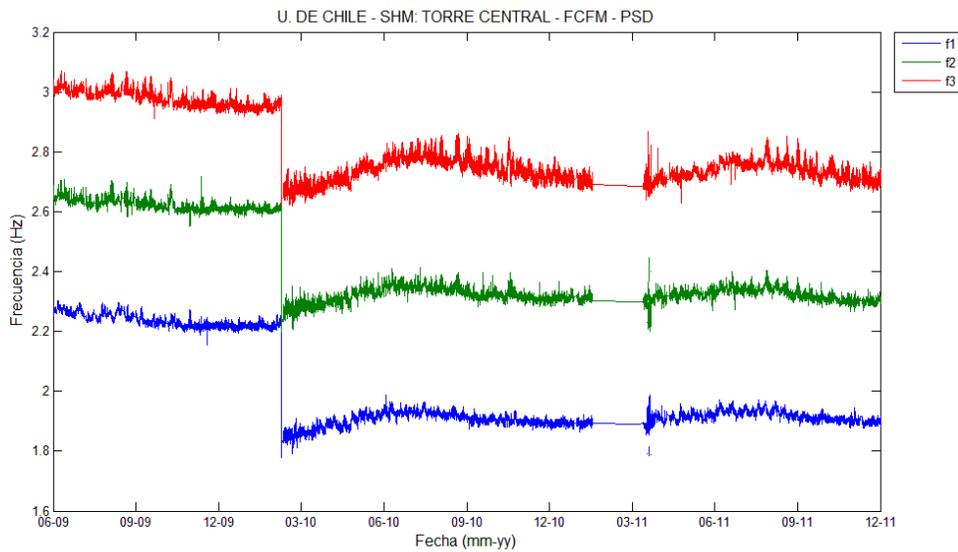


Figura 23: Serie completa, frecuencias modales 1-3, PSD

Con el nuevo proceso SSI⁷, es posible obtener, además de las frecuencias, los amortiguamientos y formas modales.

Las figuras 24 y 25 muestran un resumen de la dispersión de las frecuencias 1 a 3 mediante el algoritmo SSI, y la serie de tiempo completa entre junio de 2009 y diciembre de 2011. Cada barra incluye el número de observaciones en un ancho de 0,005 Hz.

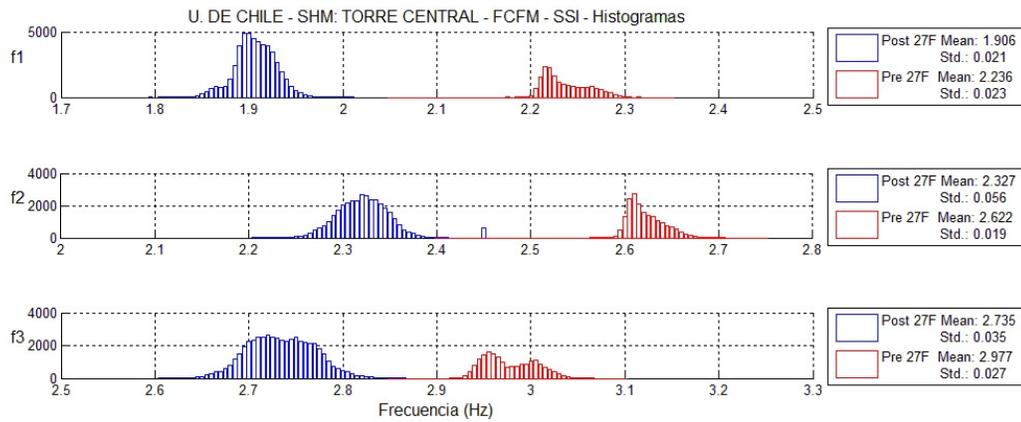


Figura 24: Histogramas frecuencias modales 1-3, antes y después del 27F, SSI

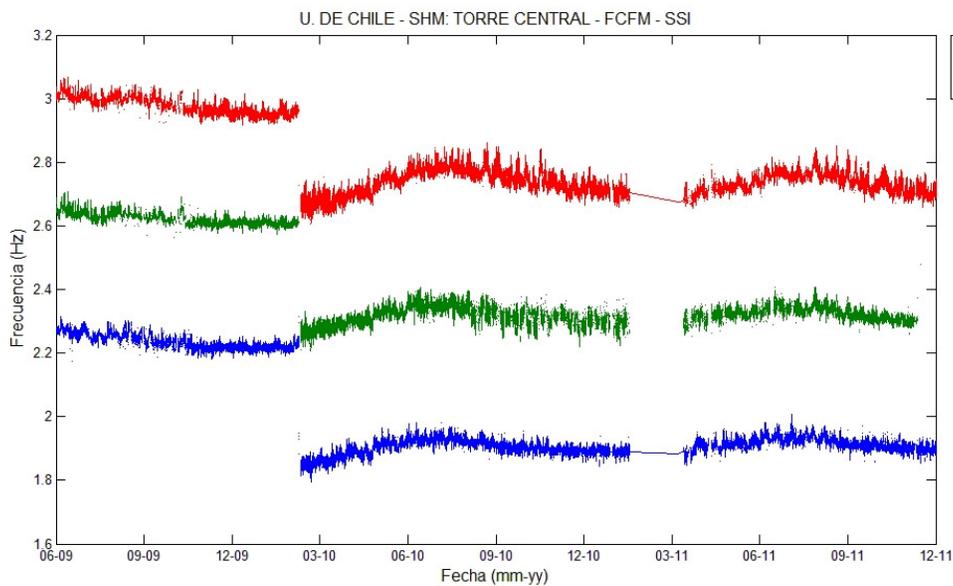


Figura 25: Serie completa, frecuencias modales 1-3, SSI

⁷ [6] Caroca.

4.1.2. Datos ambientales.

Se dispone de los siguientes registros:

- Temperatura del aire
- Humedad relativa
- Radiación Solar
- Presión atmosférica
- Precipitaciones
- Magnitud del viento instantánea (máximo en 15 min)
- Magnitud del viento promedio
- Dirección del viento
- Saturación del suelo a 10m
- Saturación del suelo a 20m

Los registros ambientales se obtienen, salvo los de saturación del suelo, del departamento de geofísica de la facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, cuyos instrumentos de medición se encuentran en la terraza del edificio de Ing.- Civil – Geofísica. Estos datos están publicados en la web y disponibles de forma gratuita⁸.

Debido a la cercanía de los edificios se considera que los datos medidos por la estación meteorológica representan fielmente las condiciones a las que está expuesto el edificio de la Torre Central.

Junto a la Torre Central se encuentran sensores que miden la saturación del suelo a 10m y 20m en intervalos de 15 minutos. Estos datos se almacenan junto con los registros de microvibraciones del edificio, a los que se accede de forma privada a través del servidor que recopila esta información.

A continuación se muestran las series de tiempo de estos registros:

⁸ Fuente: ftp://dgf.uchile.cl/pub/rgarreau/ESTACION_DGF/.

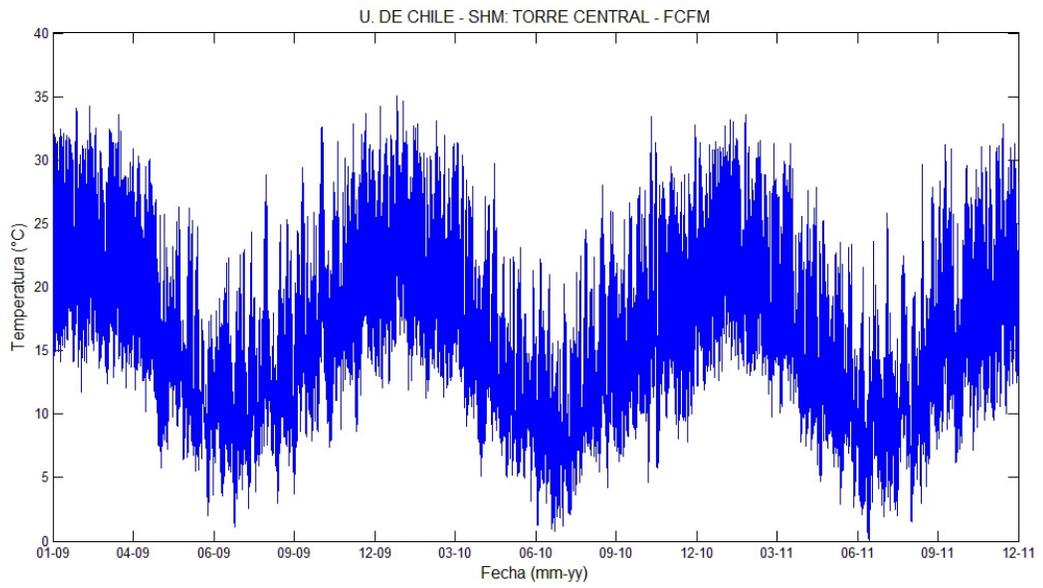


Figura 26: Serie completa, temperatura del aire

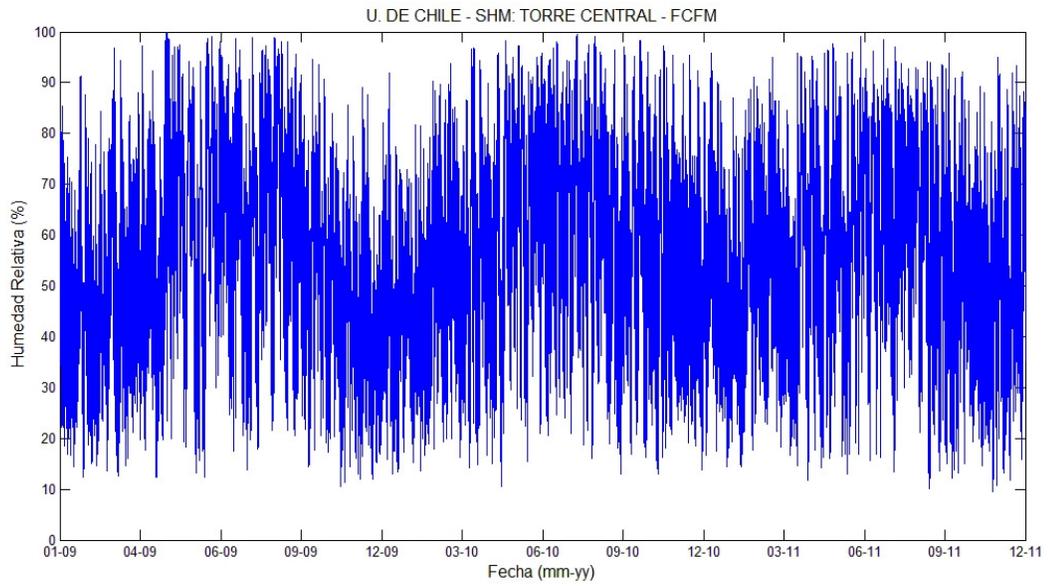


Figura 27: Serie completa, humedad relativa

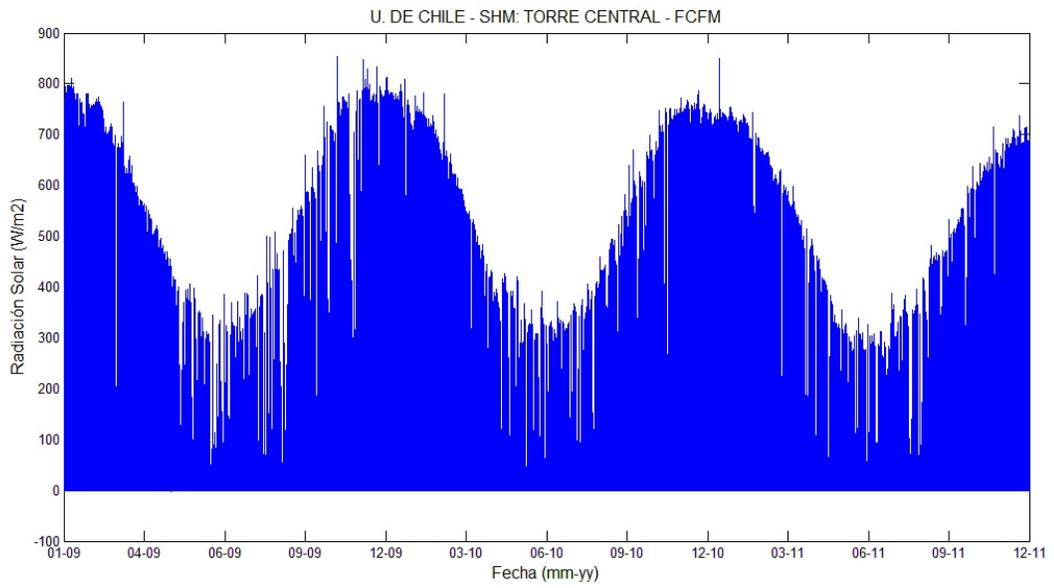


Figura 28: Serie completa, radiación solar

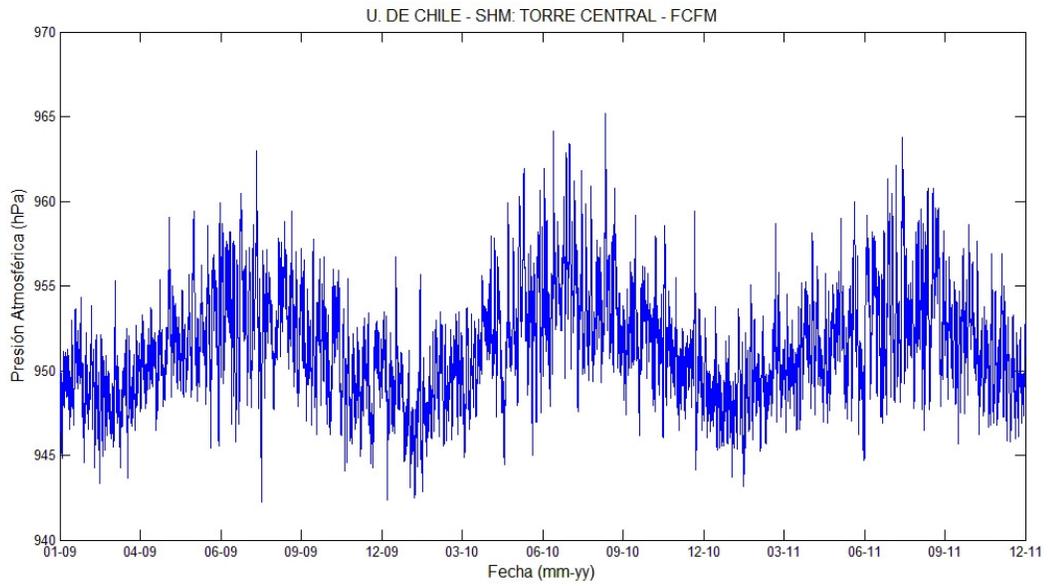


Figura 29: Serie completa, presión atmosférica

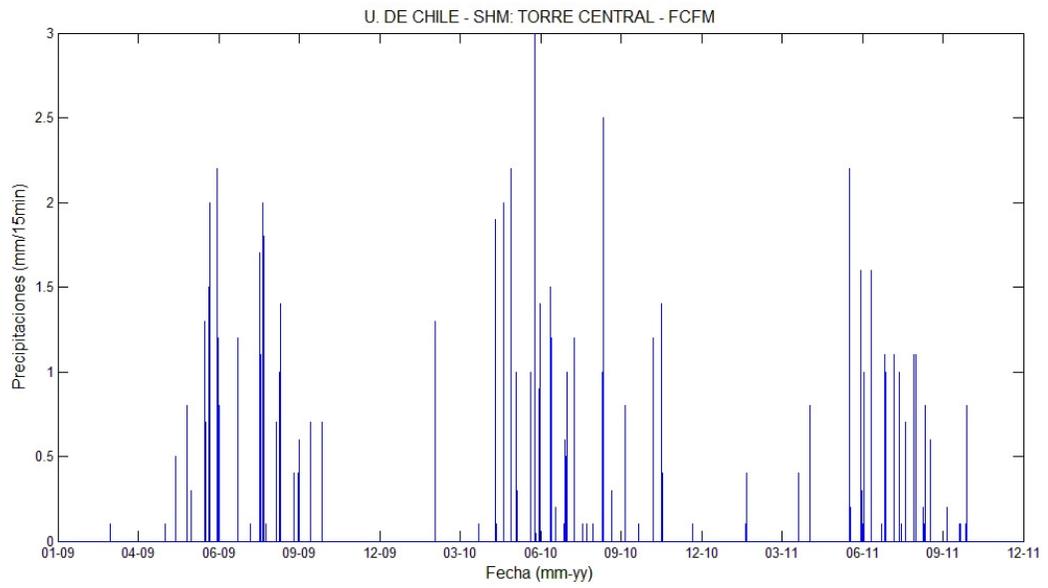


Figura 30: Serie completa, precipitaciones

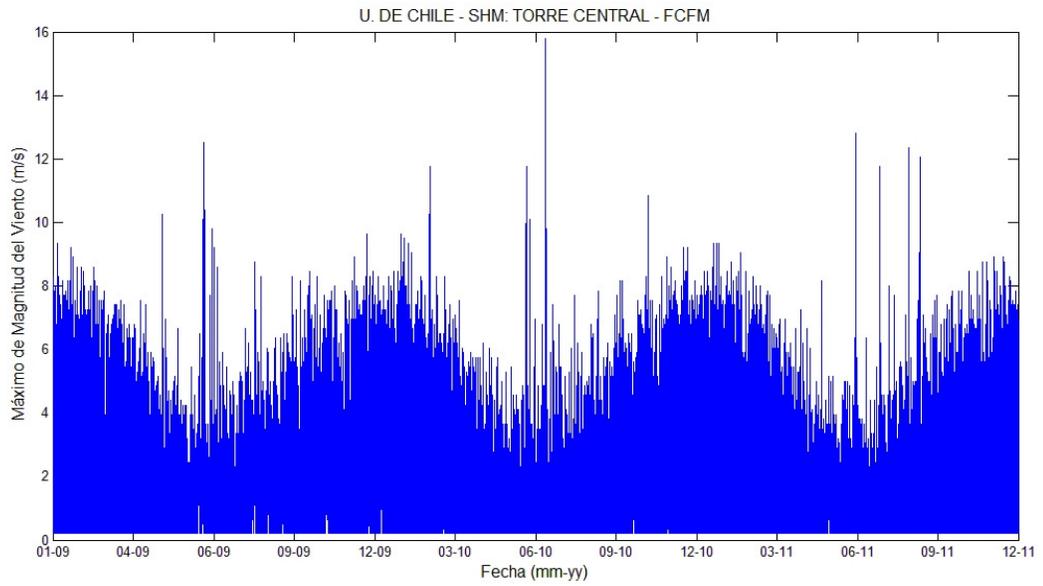


Figura 31: Serie completa, magnitud del viento instantánea

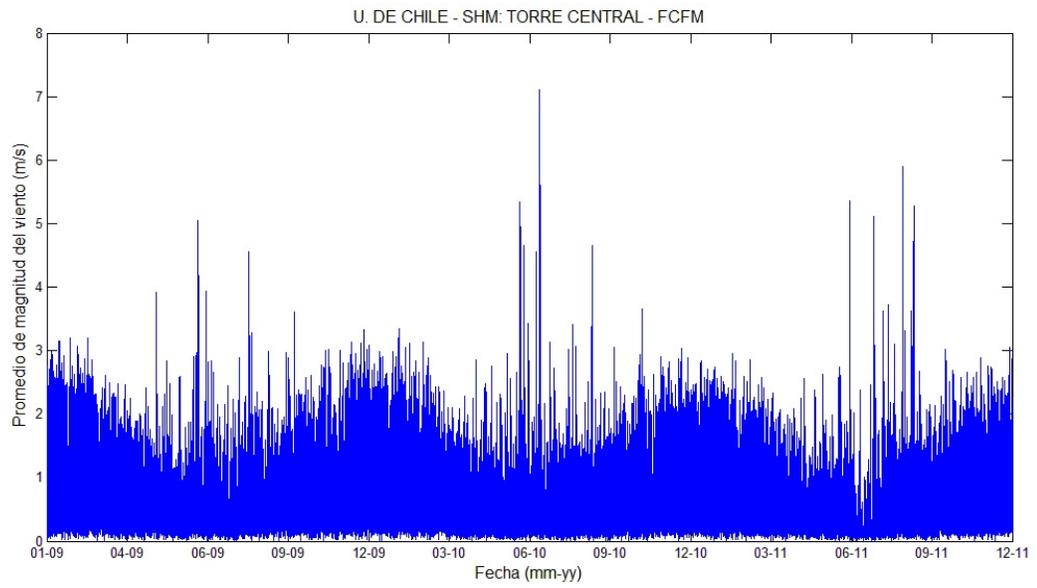


Figura 32: Serie completa, magnitud del viento promedio

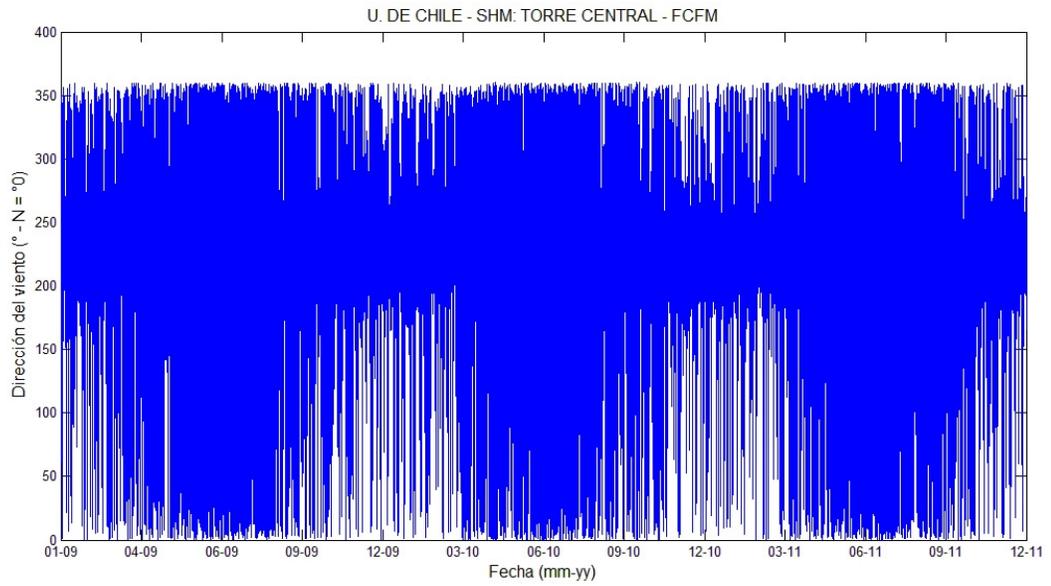


Figura 33: Serie completa, dirección del viento

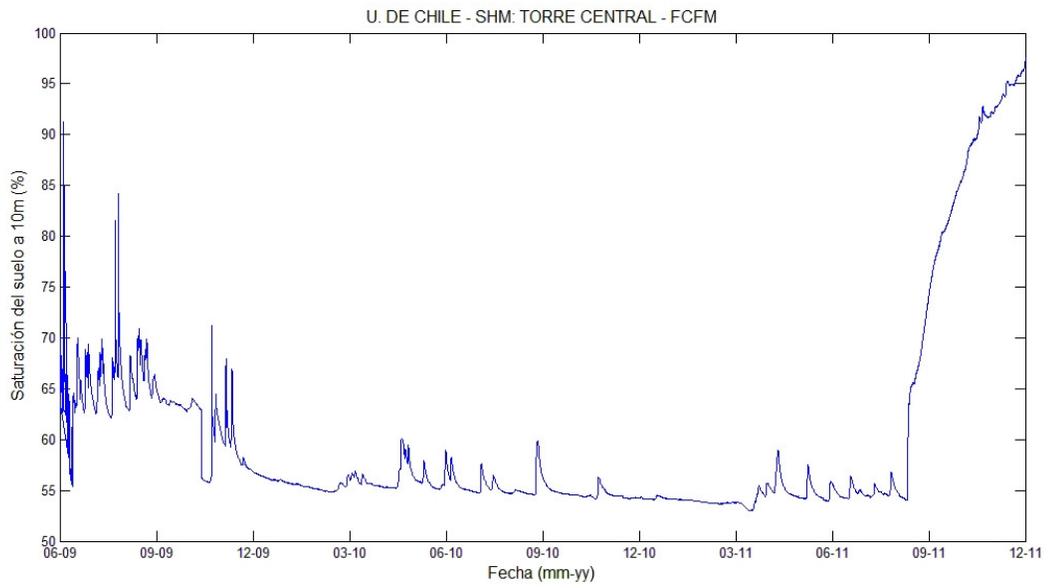


Figura 34: Serie completa, saturación del suelo a 10m

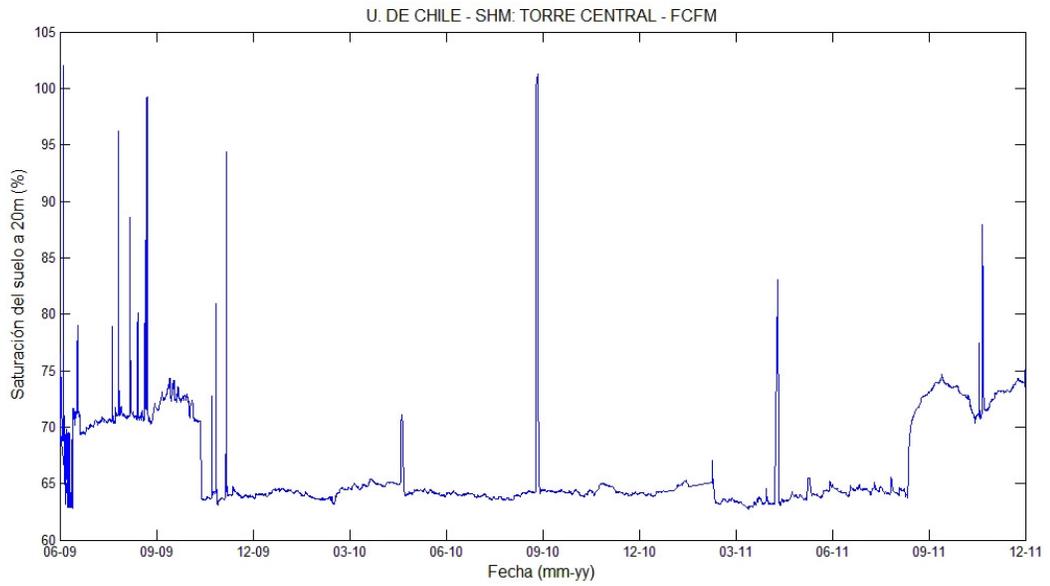


Figura 35: Serie completa, saturación del suelo a 20m

4.2. DESCRIPCION ESTADÍSTICA DE LAS VARIABLES

En las figuras 36 a 67 se muestran los histogramas de cada una de las variables dinámicas y ambientales, además en las tablas II a V se resumen los valores descriptivos de estas. En el caso de la radiación solar y precipitaciones, se omiten los valores menores o iguales a 0.

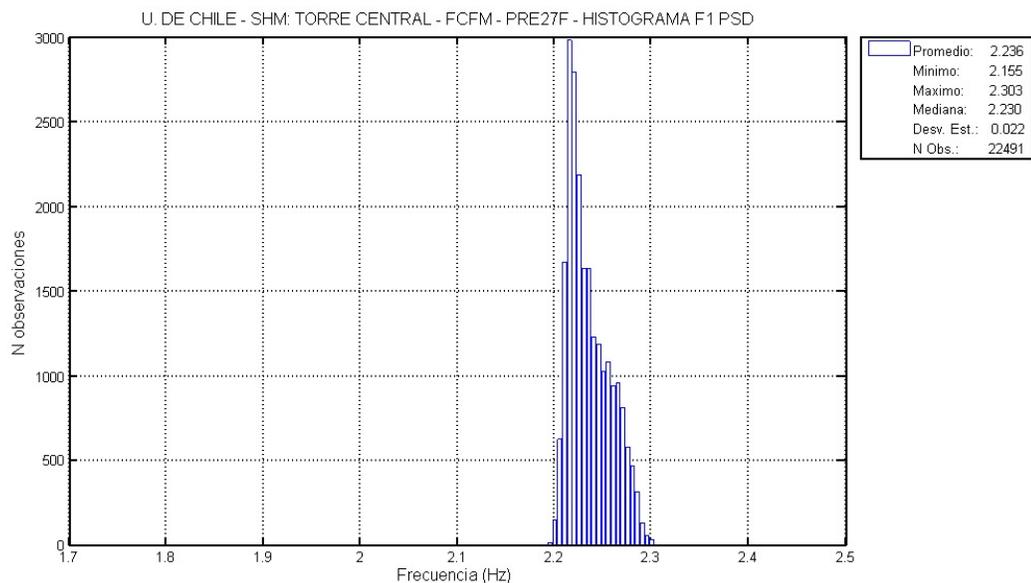


Figura 36: Histograma PRE27F – f1 PSD

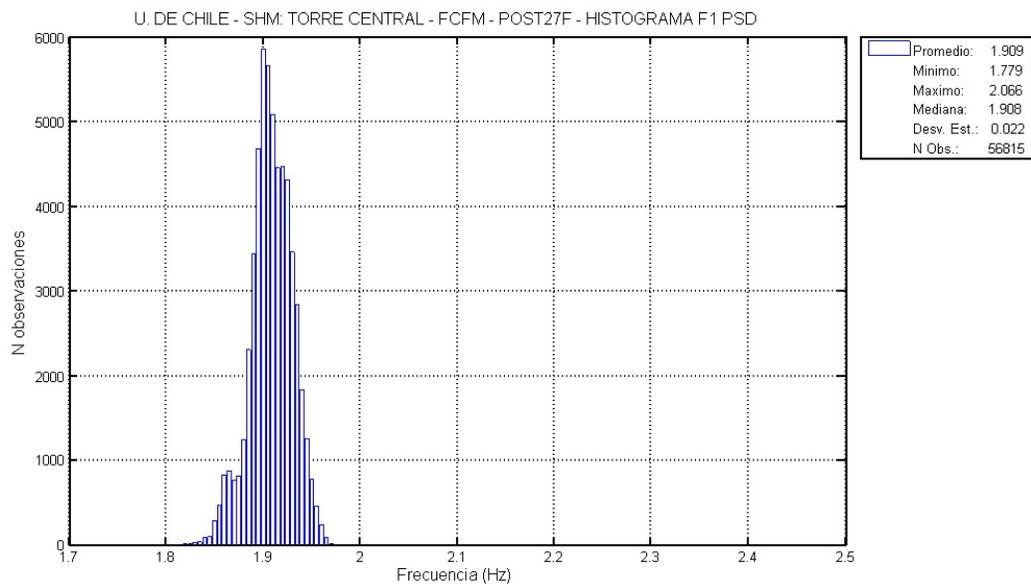


Figura 37: Histograma POST27F – f1 PSD

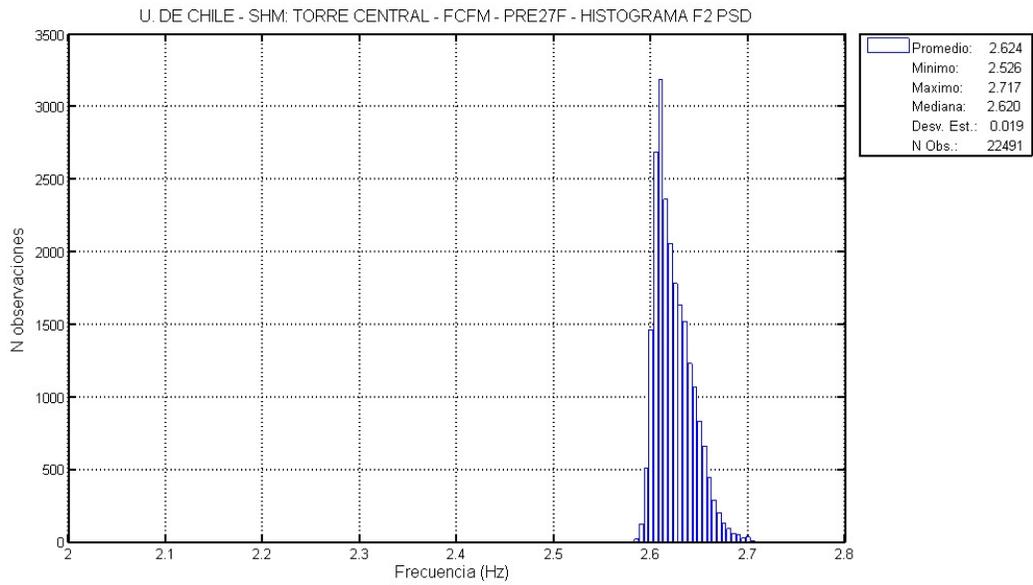


Figura 38: Histograma PRE27F – f2 PSD

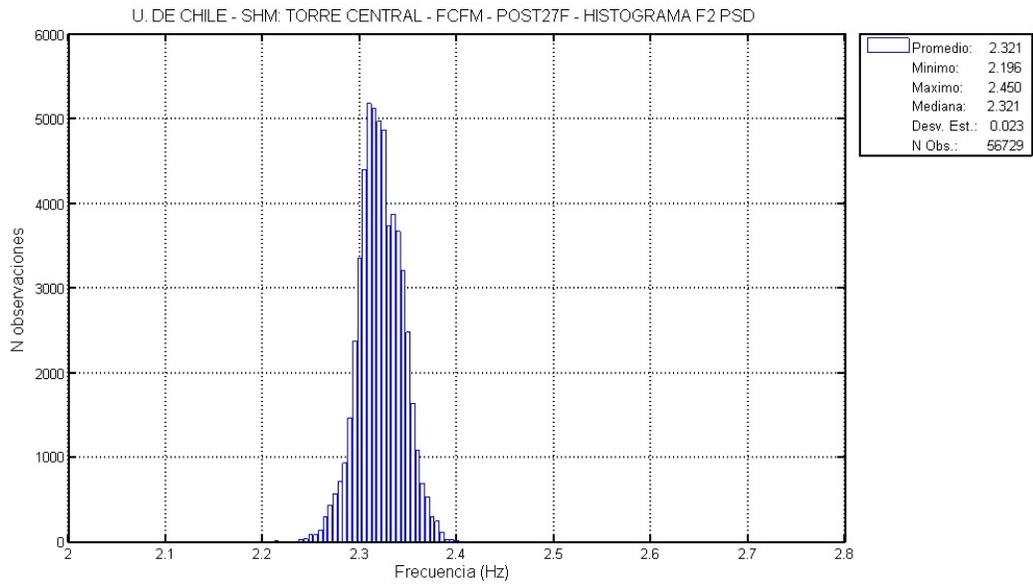


Figura 39: Histograma POST27F – f2 PSD

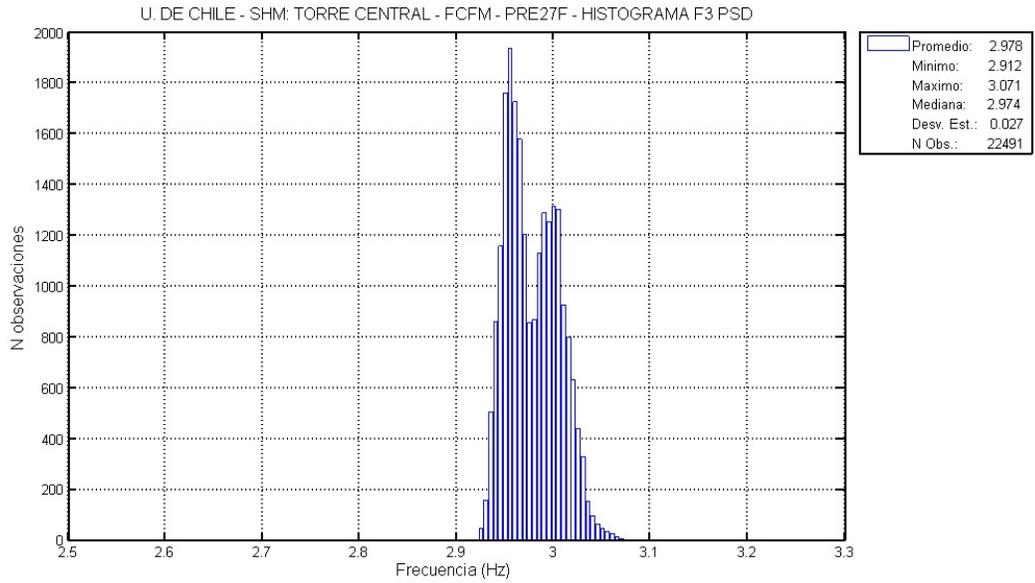


Figura 40: Histograma PRE27F – f3 PSD

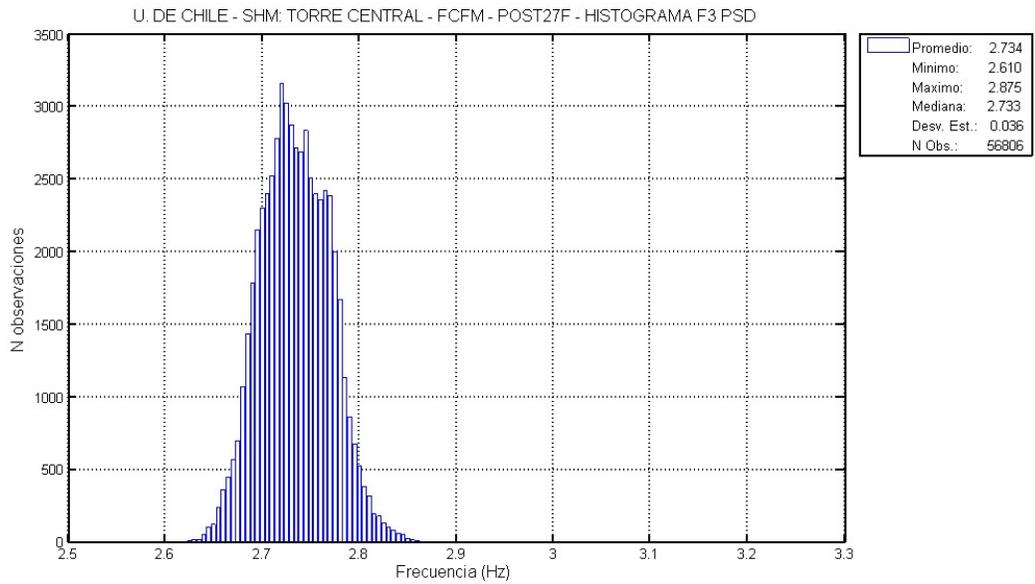


Figura 41: Histograma POST27F – f3 PSD

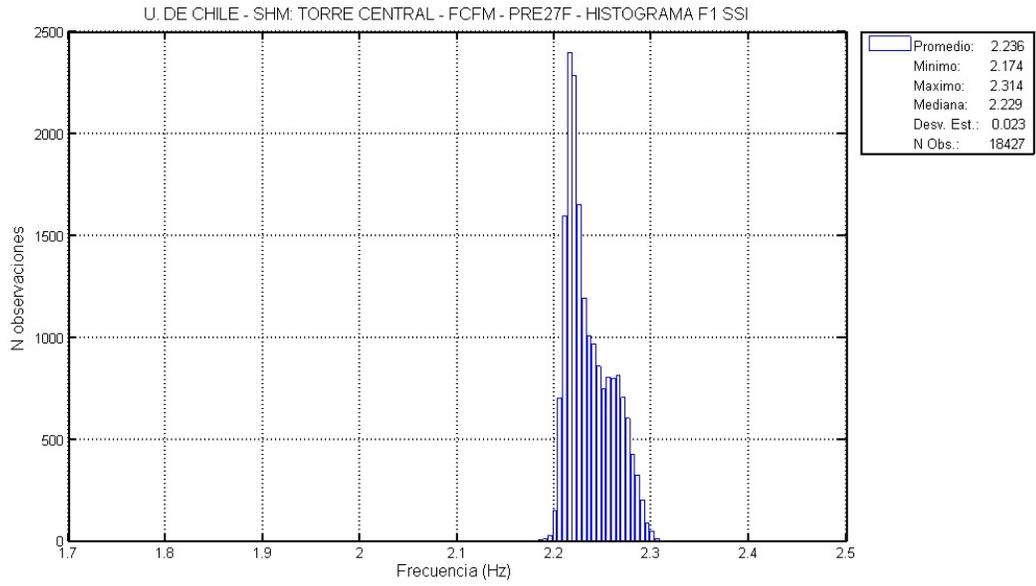


Figura 42: Histograma PRE27F – f1 SSI

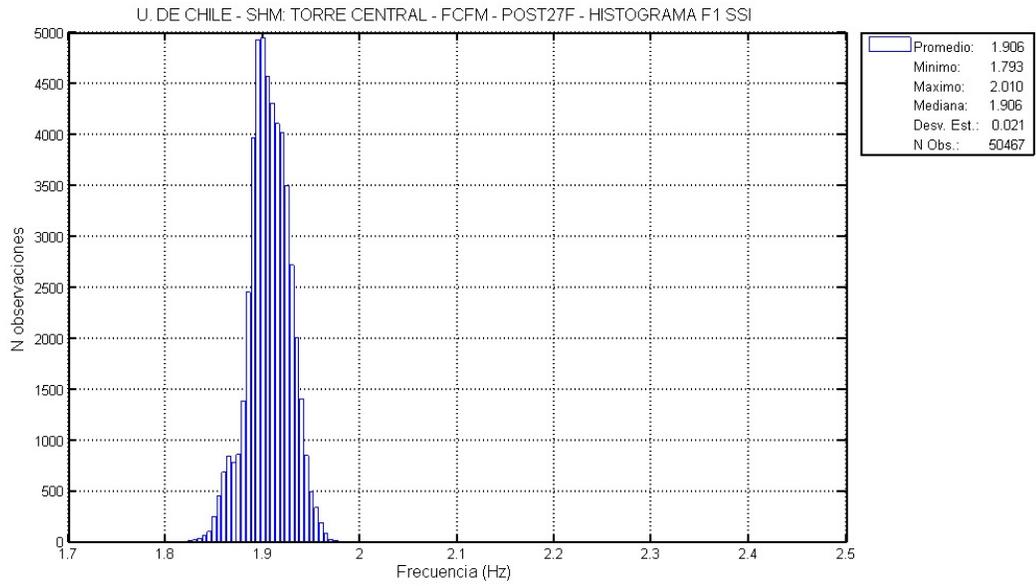


Figura 43: Histograma POST27F – f1 SSI

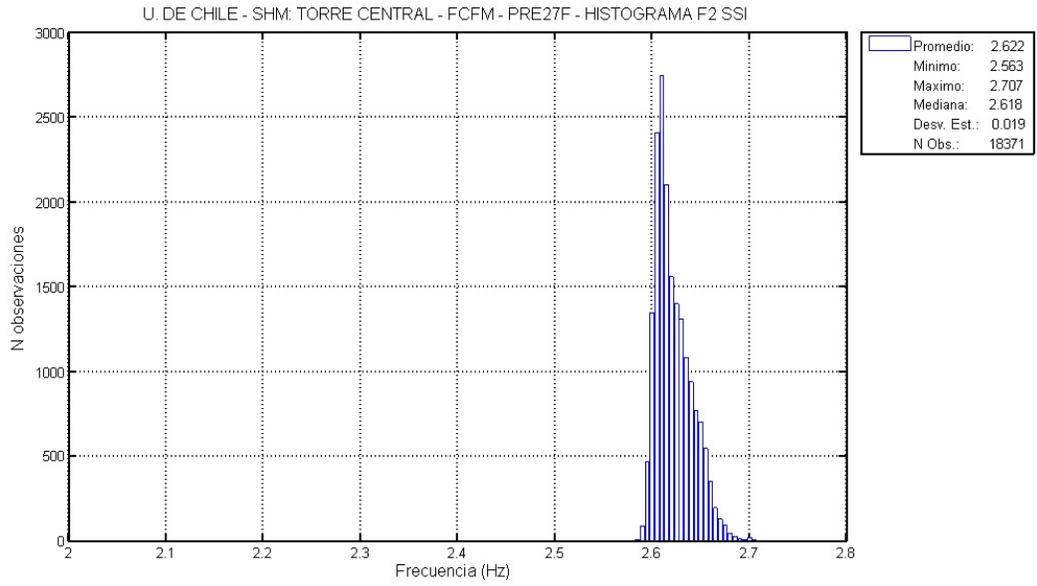


Figura 44: Histograma PRE27F – f2 SSI

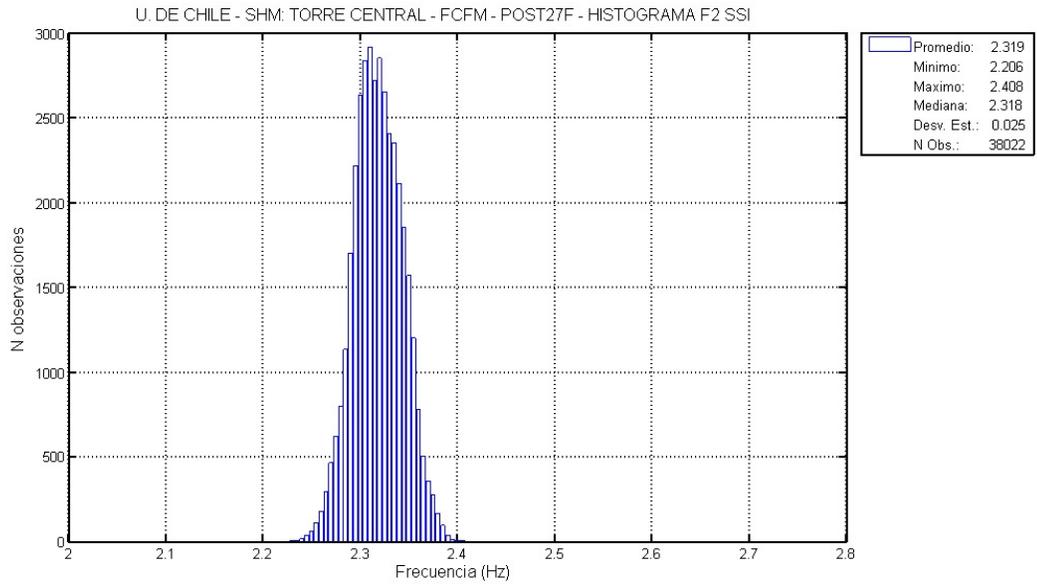


Figura 45: Histograma POST27F – f2 SSI

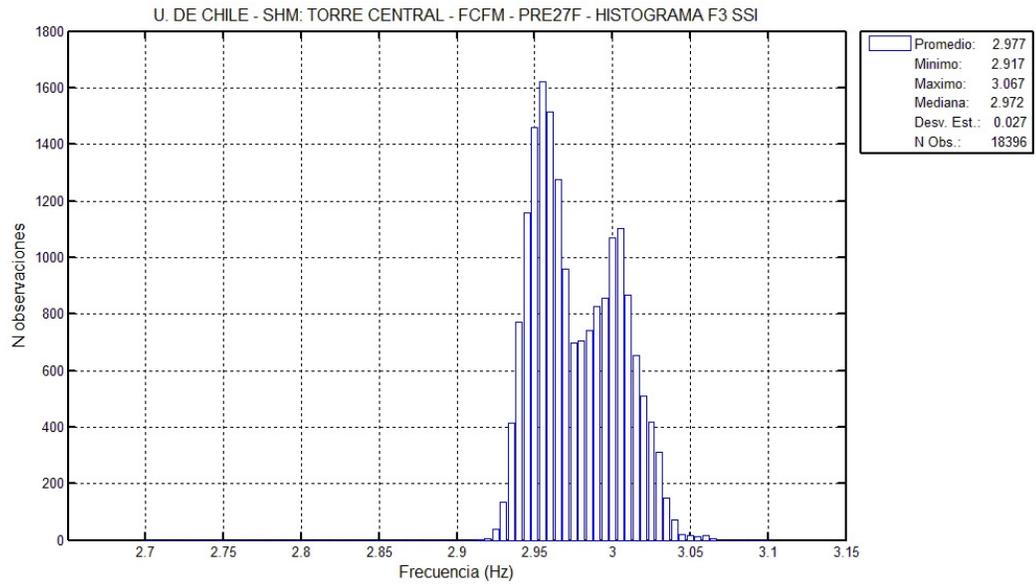


Figura 46: Histograma PRE27F – f3 SSI

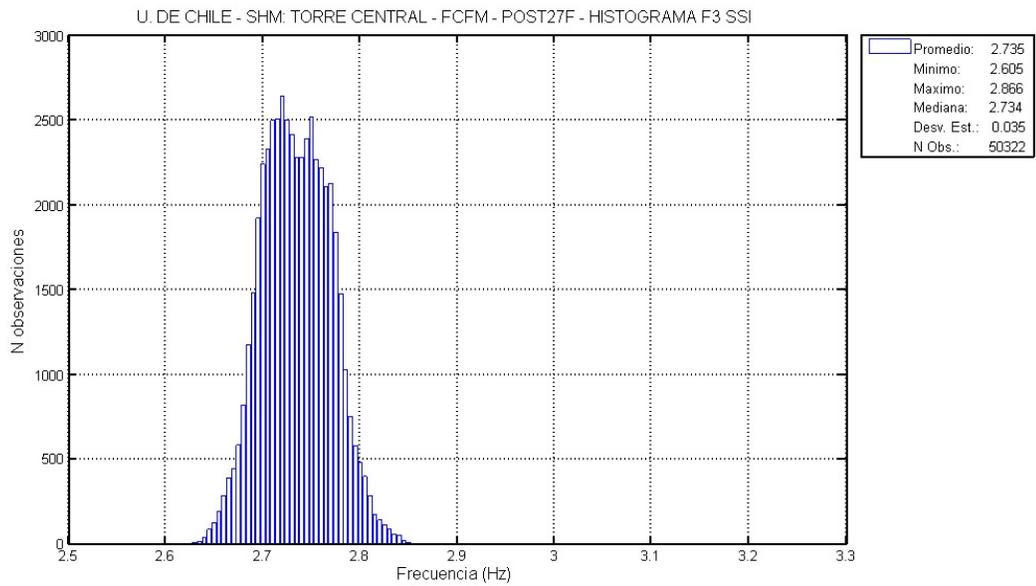


Figura 47: Histograma POST27F – f3 SSI

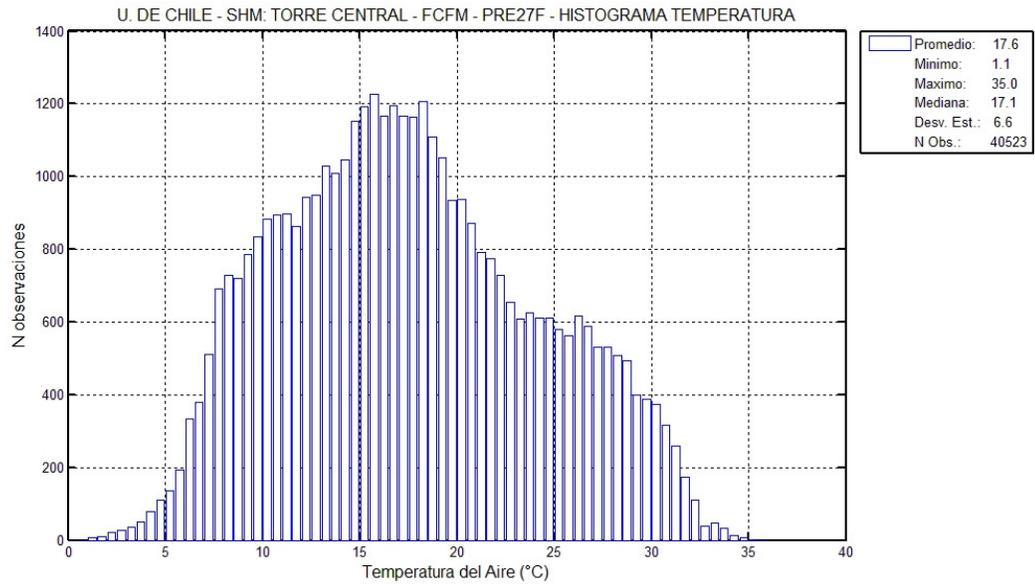


Figura 48: Histograma PRE27F – Temperatura

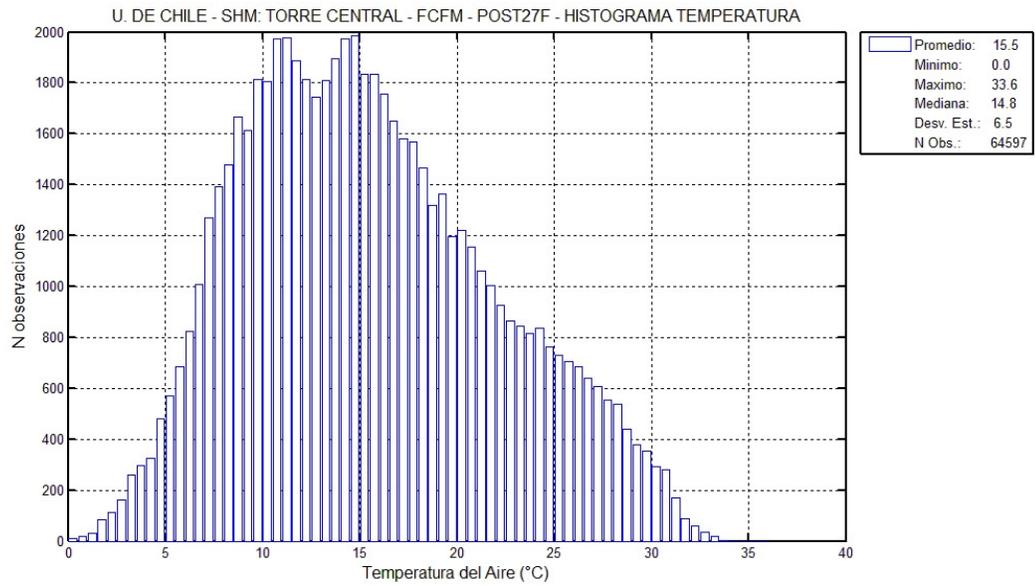


Figura 49: Histograma POST27F – Temperatura

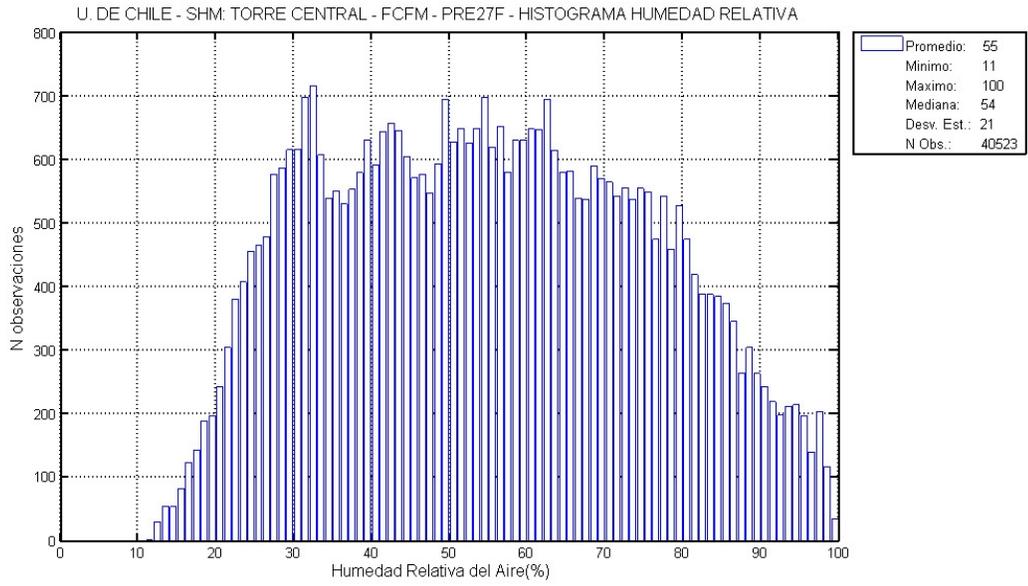


Figura 50: Histograma PRE27F – Humedad Relativa

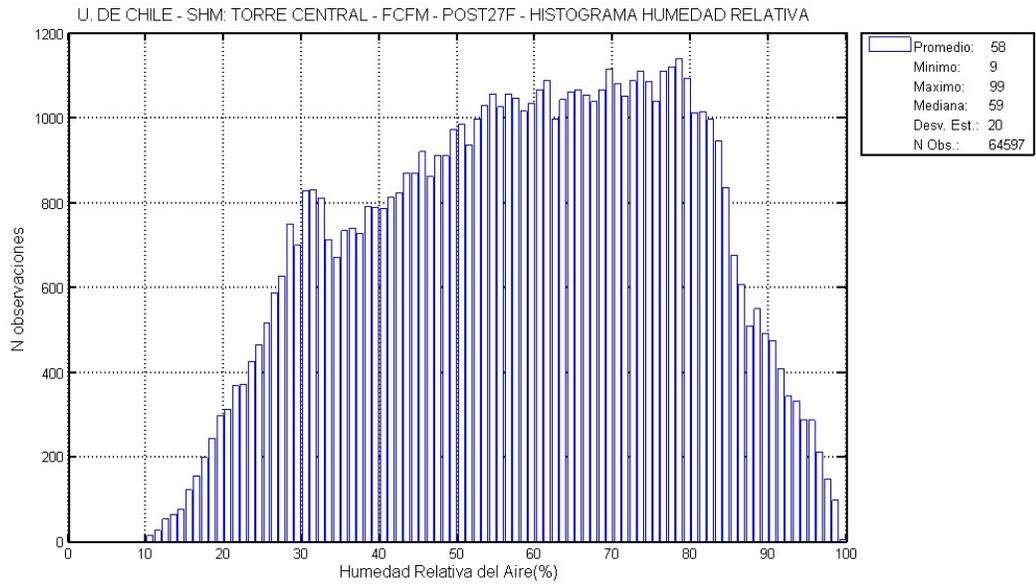


Figura 51: Histograma POST27F – Humedad Relativa

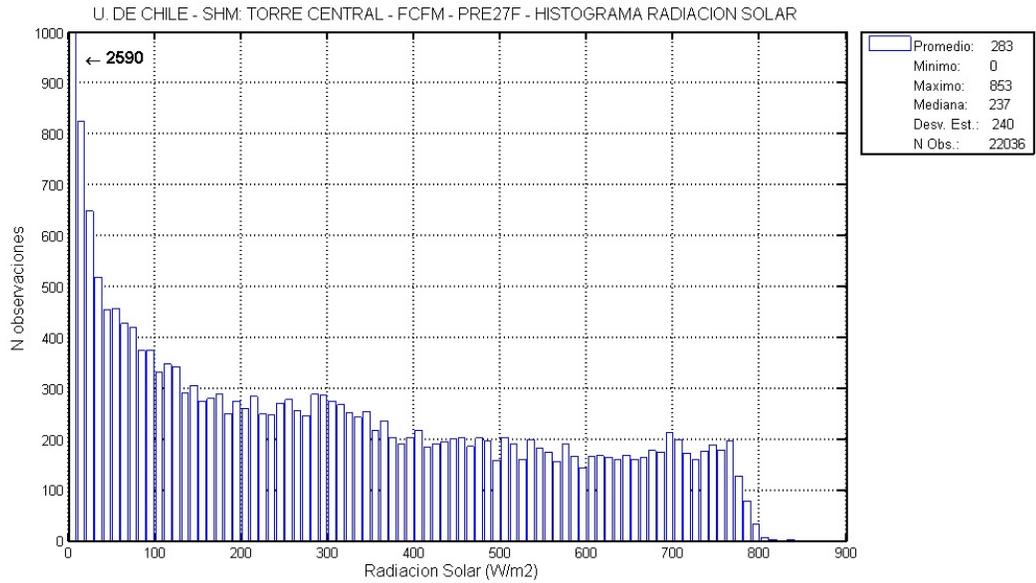


Figura 52: Histograma PRE27F – Radiación Solar

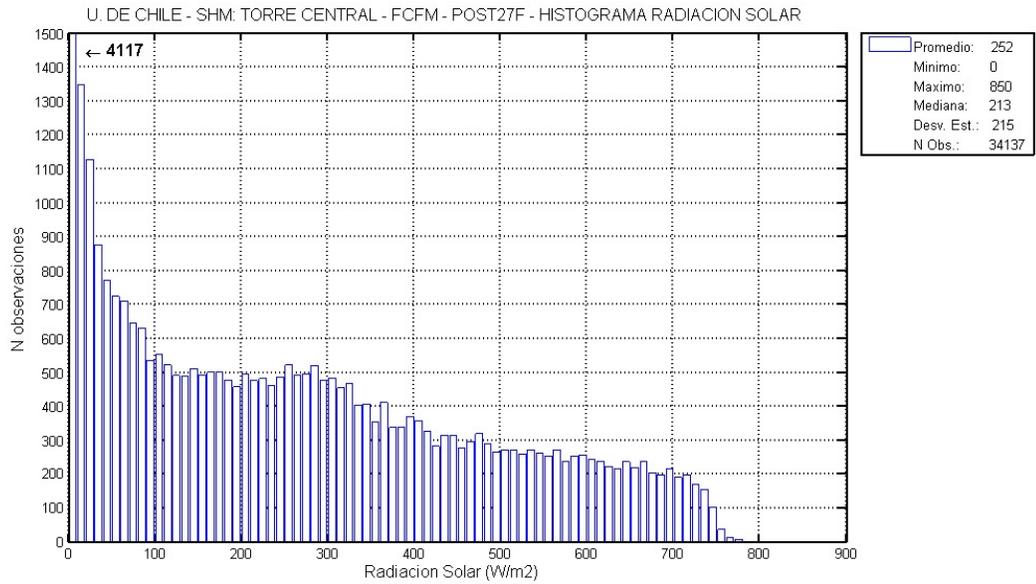


Figura 53: Histograma POST27F – Radiación Solar

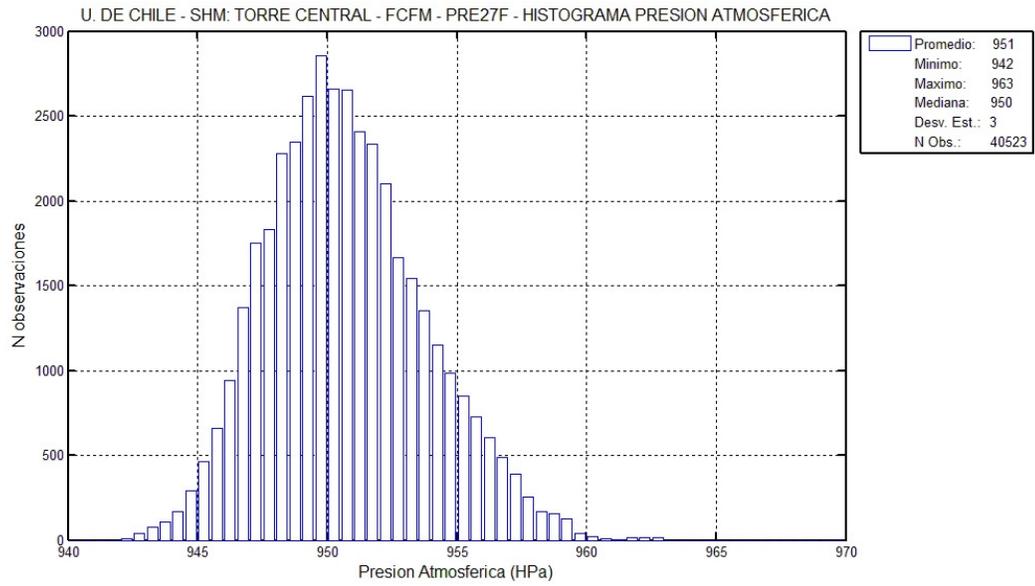


Figura 54: Histograma PRE27F – Presión Atmosférica

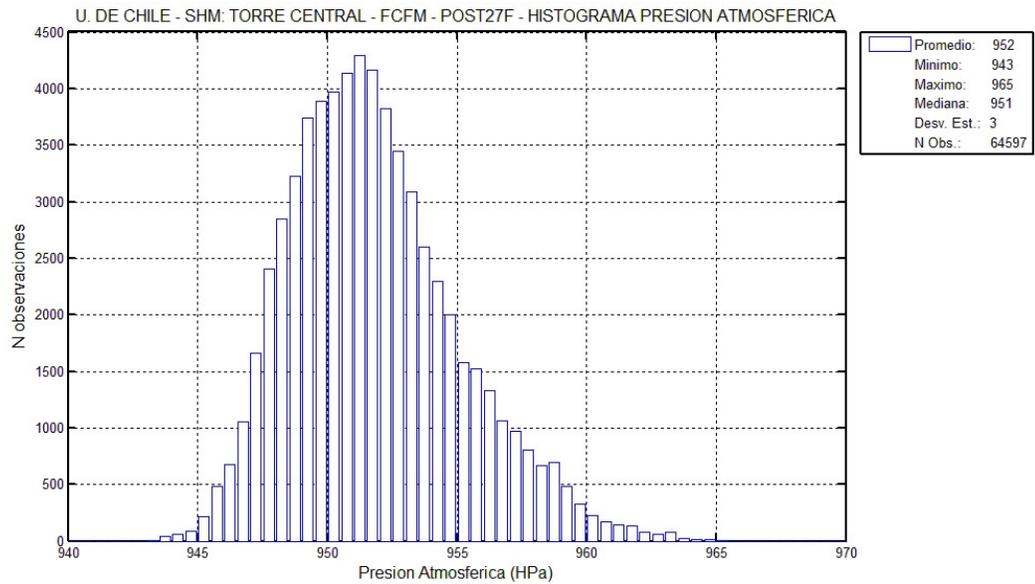


Figura 55: Histograma POST27F – Presión Atmosférica

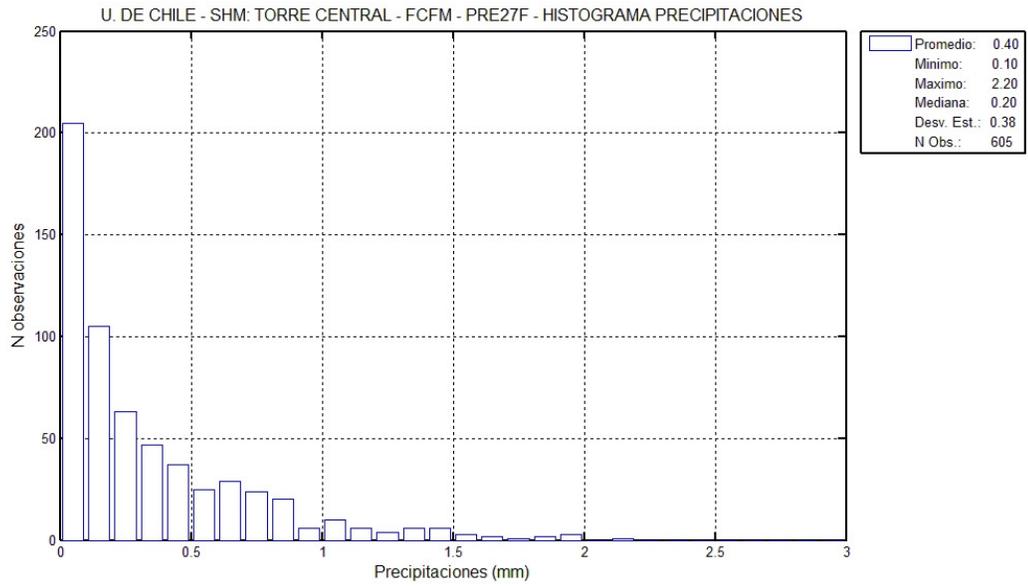


Figura 56: Histograma PRE27F – Precipitaciones

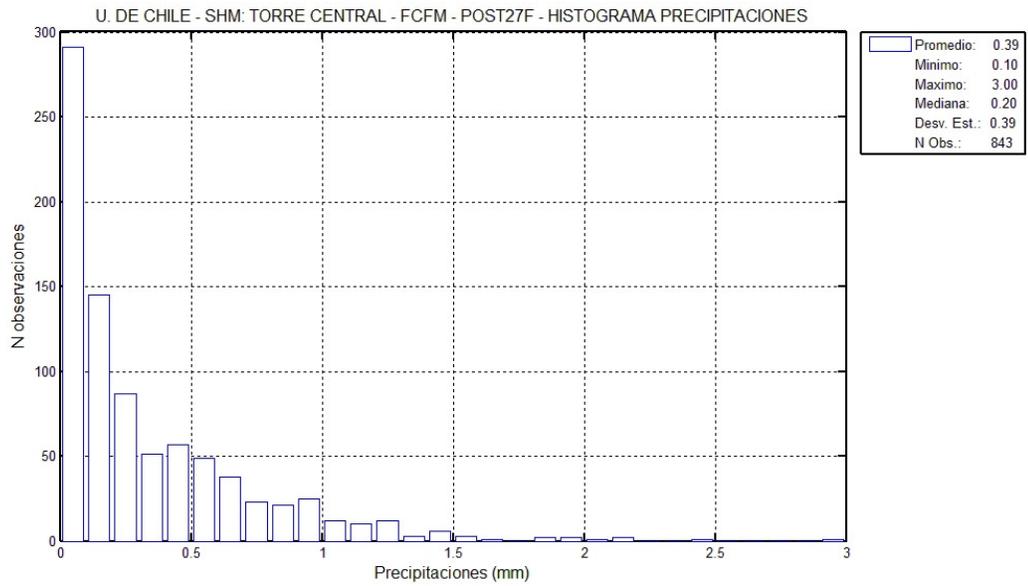


Figura 57: Histograma POST27F – Precipitaciones

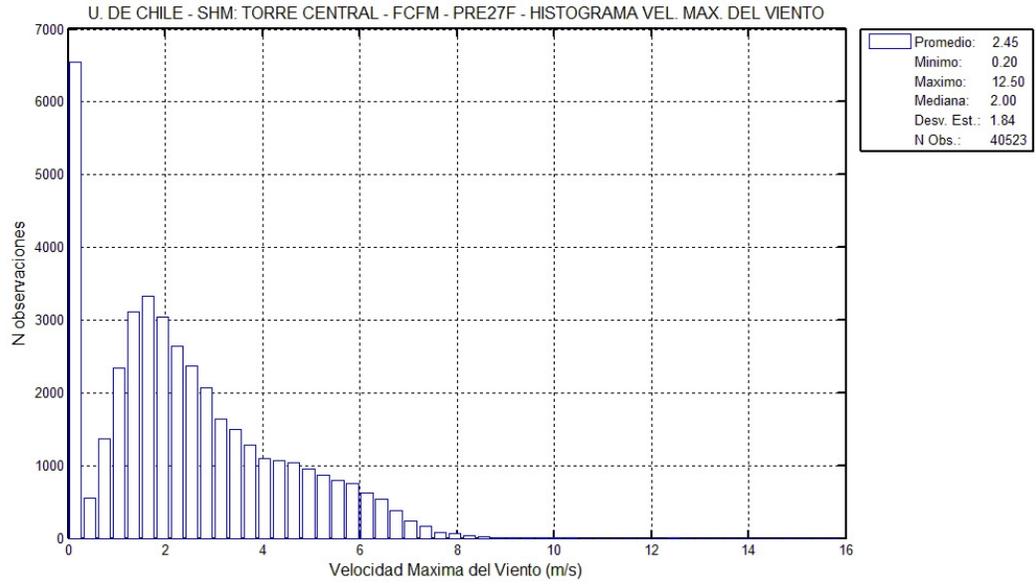


Figura 58: Histograma PRE27F – Velocidad Máxima del Viento

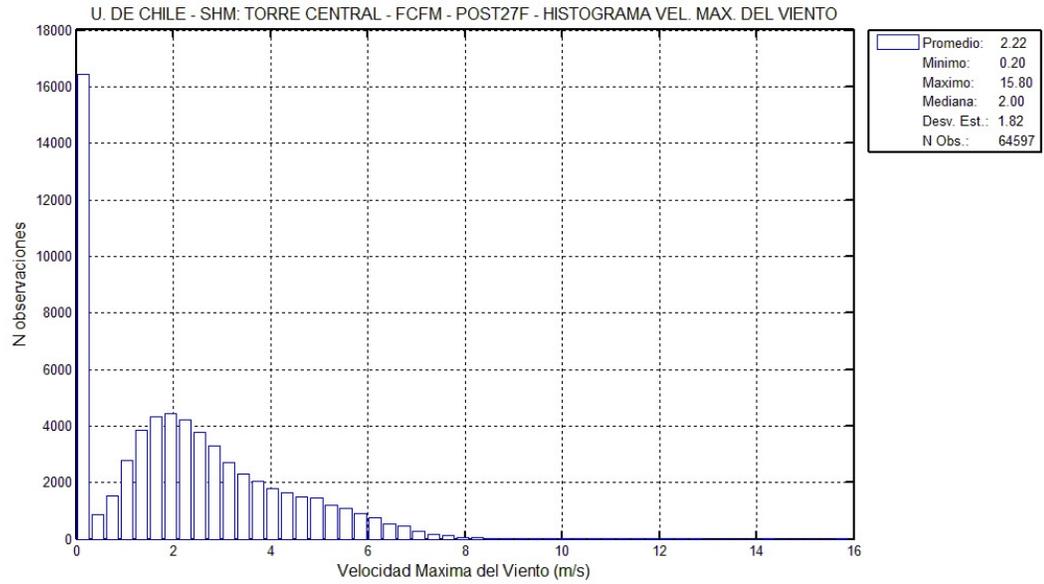


Figura 59: Histograma POST27F – Velocidad Máxima del Viento

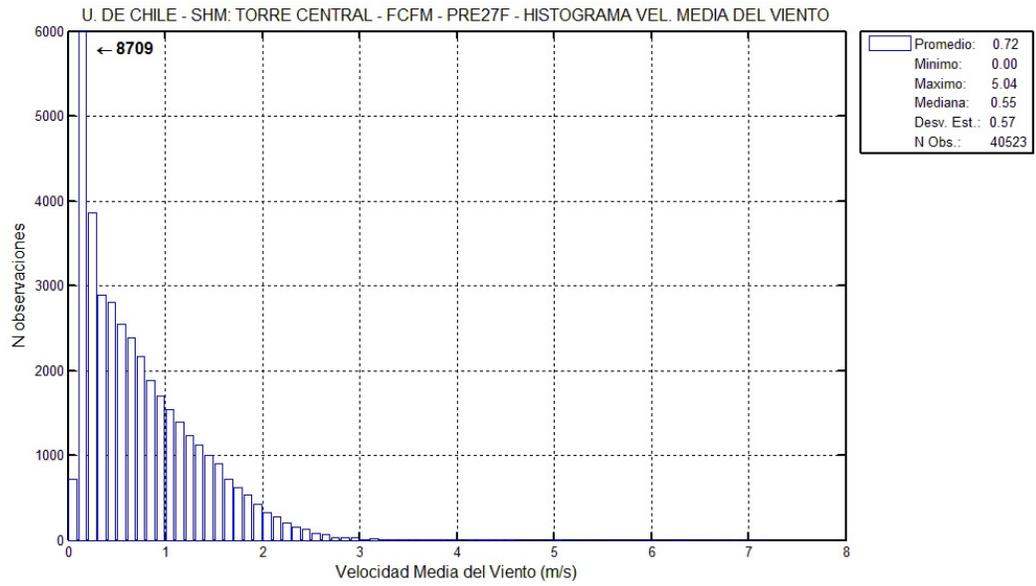


Figura 60: Histograma PRE27F – Velocidad Media del Viento

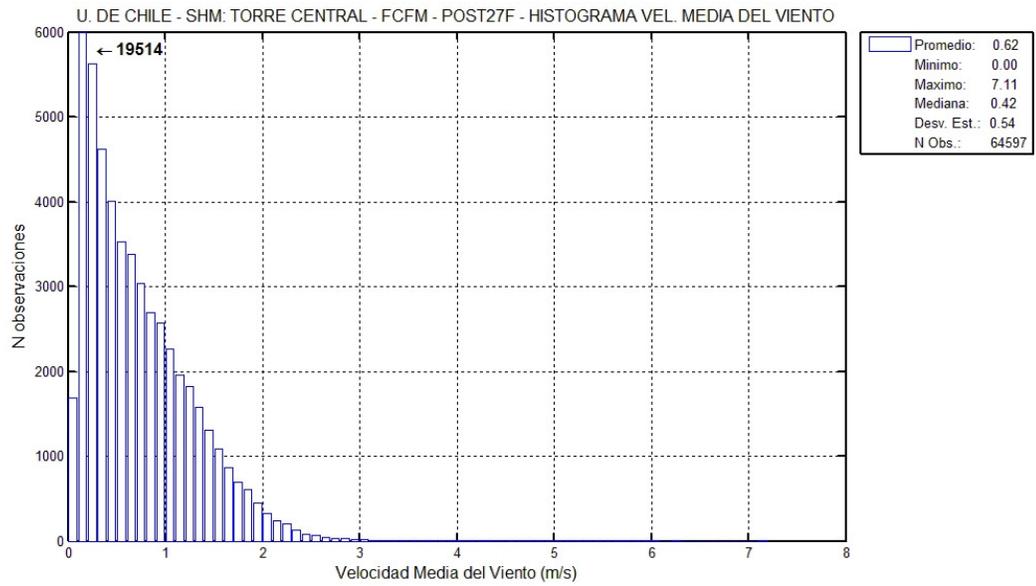


Figura 61: Histograma POST27F – Velocidad Media del Viento

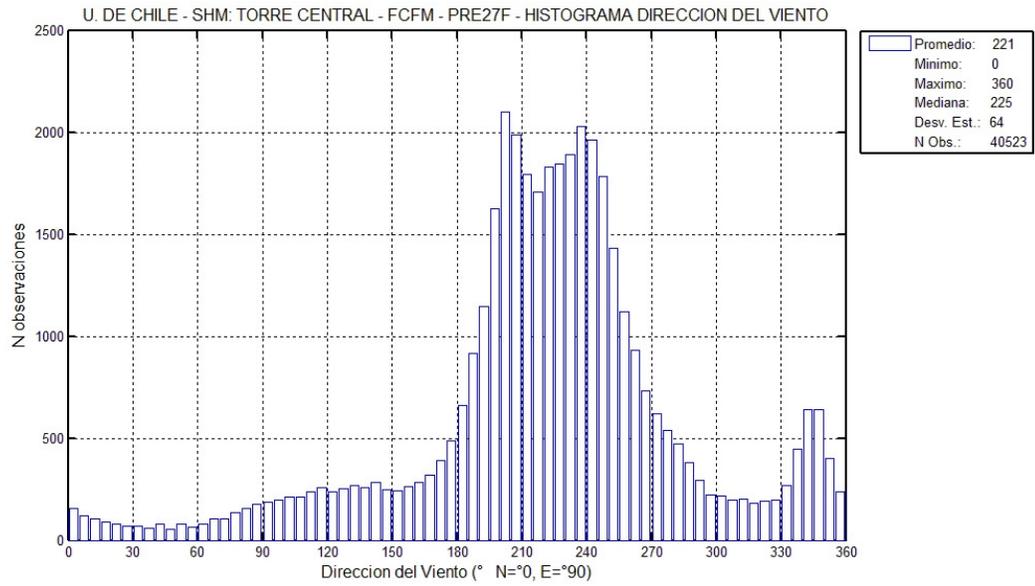


Figura 62: Histograma PRE27F – Dirección del Viento

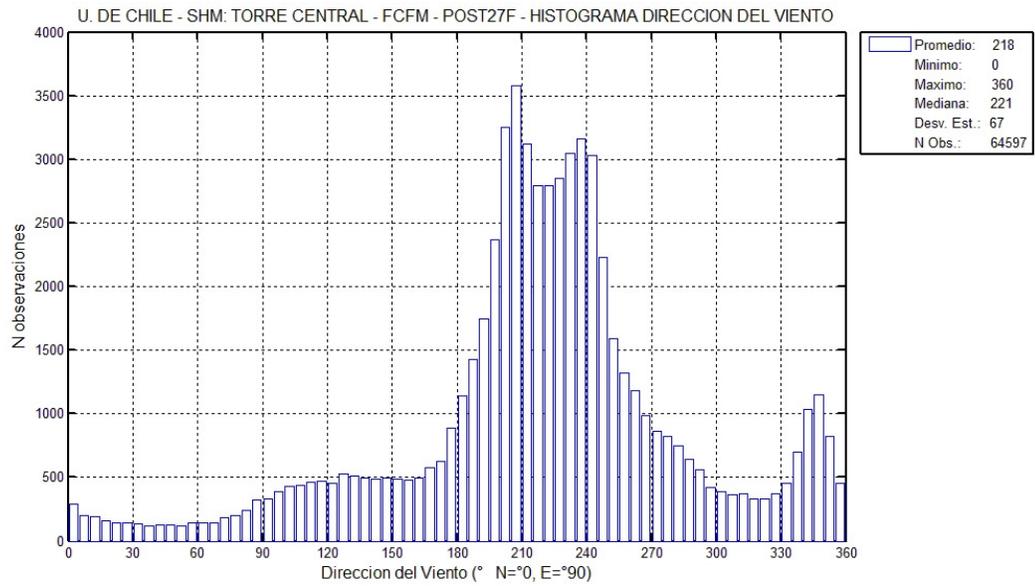


Figura 63: Histograma POST27F – Dirección del Viento

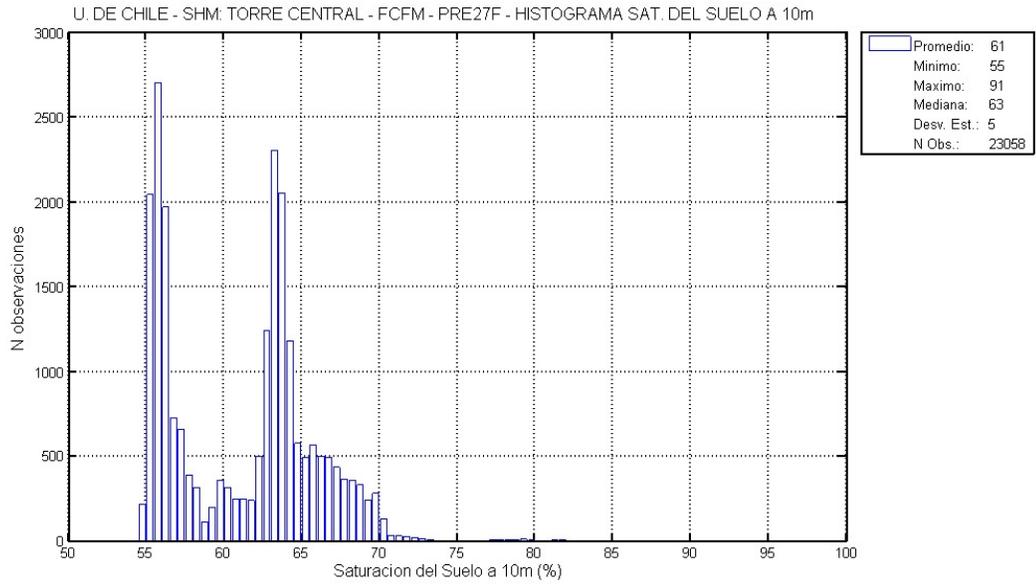


Figura 64: Histograma PRE27F – Saturación del Suelo a 10m

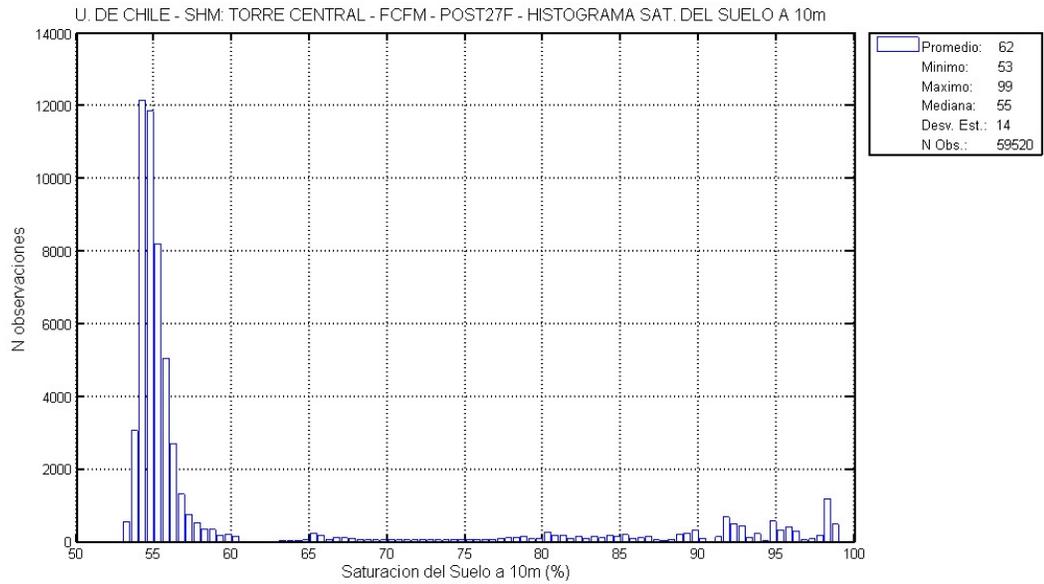


Figura 65: Histograma POST27F – Saturación del Suelo a 10m

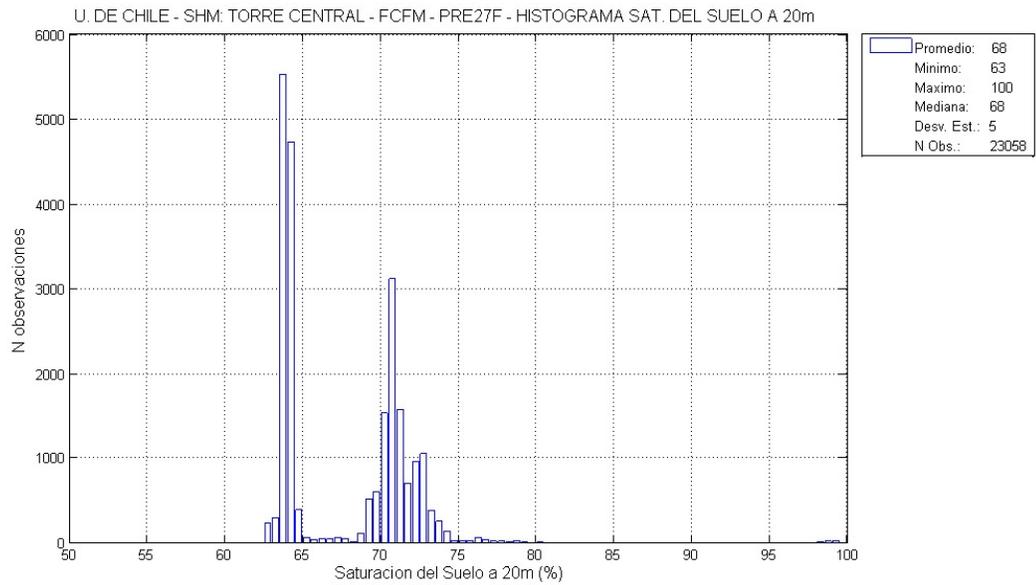


Figura 66: Histograma PRE27F – Saturación del Suelo a 20m

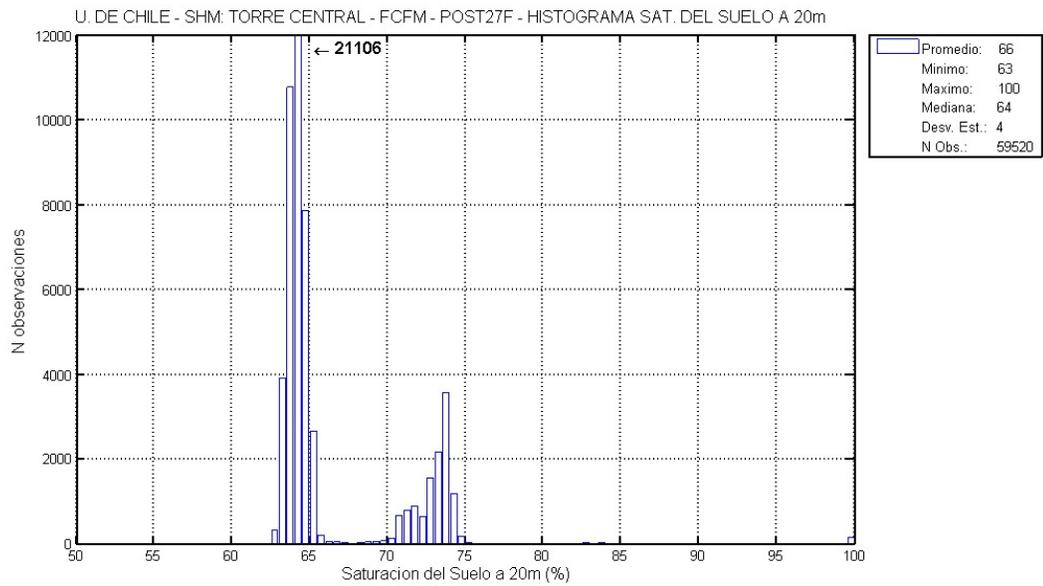


Figura 67: Histograma POST27F – Saturación del Suelo a 20m

	PSD			SSI					
	f1 (hz)	f2 (hz)	f3 (hz)	f1 (hz)	f2 (hz)	f3 (hz)	b1	b2	b3
N. Obs.	22491	22491	22491	18427	18371	18396	18427	18371	18396
Promedio	2,236	2,624	2,978	2,236	2,622	2,977	0,71%	0,68%	0,73%
Mínimo	2,155	2,526	2,912	2,174	2,563	2,917	0,11%	0,11%	0,14%
Máximo	2,303	2,717	3,071	2,314	2,707	3,067	4,96%	4,91%	4,93%
Mediana	2,230	2,620	2,974	2,229	2,618	2,972	0,67%	0,66%	0,70%
Moda	2,215	2,610	2,956	2,174	2,563	2,917	0,11%	0,11%	0,14%
Desv. Est.	0,022	0,019	0,027	0,023	0,019	0,027	0,003	0,002	0,002
Varianza	4,68E-04	3,80E-04	7,28E-04	5,45E-04	3,53E-04	7,41E-04	7,74E-06	4,18E-06	5,78E-06

Tabla II: Valores descriptivos de variables dinámicas, antes del 27F

	PSD			SSI					
	f1	f2	f3	f1	f2	f3	b1	b2	b3
N. Obs.	56815	56729	56806	50467	38022	50322	50579	38092	50433
Promedio	1,909	2,321	2,734	1,906	2,319	2,735	0,79%	0,86%	0,85%
Mínimo	1,779	2,196	2,610	1,793	2,206	2,605	0,10%	0,10%	0,10%
Máximo	2,066	2,450	2,875	2,010	2,408	2,866	5,00%	4,97%	4,98%
Mediana	1,908	2,321	2,733	1,906	2,318	2,734	0,67%	0,74%	0,81%
Moda	1,901	2,313	2,745	1,793	2,206	2,723	0,10%	0,10%	0,10%
Desv. Est.	0,022	0,023	0,036	0,021	0,025	0,035	0,006	0,005	0,003
Varianza	4,76E-04	5,24E-04	1,27E-03	4,60E-04	6,34E-04	1,24E-03	3,07E-05	2,84E-05	1,01E-05

Tabla III: Valores descriptivos de variables dinámicas, después del 27F

	Temp. Aire (°C)	Hum. Rel. (%)	Rad. Solar (W/m ²)	Pres. Atm. (hPa)	Precip. (mm)	Viento			Sat. Suelo	
						Máx. (m/s)	Prom. (m/s)	Dir. (°)	10m (%)	20m (%)
N. Obs.	40523	40523	22036	40523	605	40523	40523	40523	23058	23058
Promedio	17,6	55	283	951	0,40	2,45	0,72	221	61	68
Mínimo	1,1	11	0	942	0,10	0,20	0,00	0	55	63
Máximo	35,0	100	853	963	2,20	12,50	5,04	360	91	100
Mediana	17,1	54	237	950	0,20	2,00	0,55	225	63	68
Moda	16,4	71	0	949	0,10	0,20	0,20	230	55	64
Desv. Est.	6,6	21	240	3	0,38	1,84	0,57	64	5	5
Varianza	4,35E+01	4,21E+02	5,76E+04	9,34E+00	1,48E-01	3,37E+00	3,29E-01	4,08E+03	2,24E+01	2,03E+01

Tabla IV: Valores descriptivos de variables ambientales, antes del 27F

	Temp. Aire (°C)	Hum. Rel. (%)	Rad. Solar (W/m ²)	Pres. Atm. (hPa)	Precip. (mm)	Viento			Sat. Suelo	
						Máx. (m/s)	Prom. (m/s)	Dir. (°)	10m (%)	20m (%)
N. Obs.	64597	64597	34137	64597	843	64597	64597	64597	59520	59520
Promedio	15,5	58	252	952	0,39	2,22	0,62	218	62	66
Mínimo	0,0	9	0	943	0,10	0,20	0,00	0	53	63
Máximo	33,6	99	850	965	3,00	15,80	7,11	360	99	100
Mediana	14,8	59	213	951	0,20	2,00	0,42	221	55	64
Moda	10,8	73	0	950	0,10	0,20	0,20	207	55	64
Desv. Est.	6,5	20	215	3	0,39	1,82	0,54	67	14	4
Varianza	4,21E+01	3,99E+02	4,60E+04	1,06E+01	1,48E-01	3,33E+00	2,95E-01	4,50E+03	1,84E+02	1,70E+01

Tabla V: Valores descriptivos de variables ambientales, después del 27F

4.3. VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES MODALES A CONSECUENCIA DEL SISMO DEL 27F

Como el proceso de monitoreo continuo dio inicio en 2009, se pudo observar una disminución de la rigidez del edificio debido al terremoto del 27 de febrero de 2010.

La disminución instantánea en el valor de las frecuencias 1 a 3 fue, en promedio, de 16,6%, mientras que la disminución en el largo plazo fue de un 11,4%, según se muestra en la tabla VI.

Modo	PRE 27F		POST 27F		Diferencia (%)
	f (Hz)	SD (%)	f (Hz)	SD (%)	
1	2,24	2,16	1,91	2,16	14,6
2	2,62	1,94	2,32	2,28	11,5
3	2,98	2,72	2,73	3,56	8,2
Promedio					11,4

Tabla VI: Variación de frecuencias modales 1- 3 debido al terremoto del 27F, según método PSD

Según se ve en las figuras 23 y 25, hubo un aumento en las 3 primeras frecuencias durante los primeros meses después del terremoto, dicho aumento no es atribuible a las condiciones climáticas, pues por el mismo período de 2011, con condiciones ambientales similares, las frecuencias son levemente mayores.

No obstante el incremento mencionado, aún se aprecia una disminución en las 3 primeras frecuencias. Al comparar la variación de los valores medios de las frecuencias antes y después del terremoto, con la diferencia entre el mínimo y el máximo de cada período se obtiene lo siguiente:

POST 27 / PRE 27	0,86	0,89	0,92
PRE 27F: mín / máx	0,94	0,94	0,93
POST 27: mín / máx	0,90	0,90	0,92

Tabla VII: Comparación en la variación de las frecuencias, según método PSD

4.4. ANÁLISIS DE LOS DATOS PREVIOS AL SISMO DEL 27F

4.4.1. CORRELACIONES INDIVIDUALES

Se ha observado que la mejor correlación entre variables dinámicas y ambientales no ocurre comparando los datos al mismo momento, sino que hay un retraso entre la presentación de la condición ambiental y la respuesta del edificio ante dicha condición, para esto se evalúa mediante una rutina de Matlab el “lack” de tiempo asociado a la mejor correlación individual. A continuación se presenta en tablas los resultados de las mejores correlaciones obtenidas y el “lack” asociado a estas.

La columna R representa la correlación entre las variables y en la columna R2 se muestra el estadístico R2 asociado a la regresión en que la variable X es la ambiental y la variable Y es la frecuencia. Los valores de las columnas A(...) y B son los coeficientes de la regresión asociada a la mejor correlación, siendo A la pendiente de la recta. Finalmente la columna lack muestra en minutos el desfase de tiempo entre la presentación de la condición ambiental y el efecto en el valor de la frecuencia modal respectiva asociada a la mejor correlación.

		Temperatura (°C)				
		R	R2	A (hz/°C)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	-0,76	0,58	-2,48E-03	2,277	195
	SSI	-0,79	0,62	-2,70E-03	2,282	195
f2	PSD	-0,54	0,29	-1,60E-03	2,651	1035
	SSI	-0,61	0,37	-1,68E-03	2,651	1095
f3	PSD	-0,64	0,41	-2,61E-03	3,022	1155
	SSI	-0,71	0,50	-2,84E-03	3,025	1215

Tabla VIII: Correlación entre frecuencias y temperatura

		Humedad Relativa del aire (%)				
		R	R2	A (hz/%)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	0,68	0,46	7,19E-04	2,196	195
	SSI	0,70	0,49	7,98E-04	2,192	180
f2	PSD	0,50	0,25	4,75E-04	2,598	990
	SSI	0,55	0,30	5,03E-04	2,595	1080
f3	PSD	0,52	0,27	6,82E-04	2,941	1110
	SSI	0,58	0,34	7,70E-04	2,935	1200

Tabla IX: Correlación entre frecuencias y humedad relativa del aire

		Radiación Solar (W/m^2)				
		R	R2	A ($hz/W/m^2$)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	-0,51	0,26	-4,26E-05	2,242	285
	SSI	-0,53	0,28	-4,68E-05	2,243	300
f2	PSD	-0,50	0,25	-3,70E-05	2,630	1260
	SSI	-0,51	0,26	-3,65E-05	2,629	1275
f3	PSD	-0,52	0,27	-5,77E-05	2,989	1365
	SSI	-0,57	0,32	-6,22E-05	2,988	1380

Tabla X: Correlación entre frecuencias y radiación solar

		Presión Atmosférica (HPa)				
		R	R2	A (hz/HPa)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	0,62	0,39	3,99E-03	-1,558	45
	SSI	0,63	0,40	4,27E-03	-1,824	150
f2	PSD	0,46	0,21	2,61E-03	0,142	1050
	SSI	0,50	0,25	2,71E-03	0,047	1020
f3	PSD	0,55	0,30	4,36E-03	-1,168	1155
	SSI	0,58	0,34	4,58E-03	-1,376	1170

Tabla XI: Correlación entre frecuencias y presión atmosférica

		Precipitaciones (mm)				
		R	R2	A (hz/mm)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	0,37	0,14	1,49E-02	2,267	1320
	SSI	0,32	0,10	1,17E-02	2,274	1305
f2	PSD	0,27	0,08	1,04E-02	2,645	1440
	SSI	0,18	0,03	5,97E-03	2,651	1035
f3	PSD	0,23	0,05	9,79E-03	3,005	930
	SSI	0,18	0,03	6,52E-03	3,010	1440

Tabla XII: Correlación entre frecuencias y precipitaciones

		Velocidad del Viento Máxima (m/s)				
		R	R2	A (hz/m/s)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	-0,42	0,18	-4,94E-03	2,248	90
	SSI	-0,43	0,19	-5,40E-03	2,249	60
f2	PSD	-0,38	0,15	-4,05E-03	2,634	1050
	SSI	-0,37	0,14	-3,73E-03	2,632	1080
f3	PSD	-0,45	0,20	-6,58E-03	2,995	1140
	SSI	-0,46	0,21	-6,66E-03	2,994	1185

Tabla XIII: Correlación entre frecuencias y velocidad máxima del viento

		Velocidad del Viento Promedio (m/s)				
		R	R2	A (hz/m/s)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	-0,38	0,14	-1,40E-02	2,246	60
	SSI	-0,39	0,15	-1,52E-02	2,247	60
f2	PSD	-0,32	0,10	-1,09E-02	2,632	1050
	SSI	-0,32	0,10	-1,01E-02	2,630	1080
f3	PSD	-0,40	0,16	-1,85E-02	2,992	1140
	SSI	-0,40	0,16	-1,86E-02	2,991	1155

Tabla XIV: Correlación entre frecuencias y velocidad media del viento

		Dirección del Viento (°)				
		R	R2	A (hz/°)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	-0,21	0,04	-6,91E-05	2,251	630
	SSI	-0,22	0,05	-8,43E-05	2,255	540
f2	PSD	-0,16	0,03	-4,83E-05	2,634	660
	SSI	-0,18	0,03	-5,54E-05	2,635	525
f3	PSD	-0,16	0,03	-6,74E-05	2,993	1350
	SSI	-0,19	0,04	-8,28E-05	2,995	465

Tabla XV: Correlación entre frecuencias y dirección del viento

		Saturación del Suelo a 10m (%)				
		R	R2	A (hz/%)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	0,66	0,44	3,03E-03	2,050	810
	SSI	0,69	0,47	3,27E-03	2,038	900
f2	PSD	0,60	0,36	2,45E-03	2,474	1440
	SSI	0,63	0,39	2,40E-03	2,477	1440
f3	PSD	0,67	0,45	3,84E-03	2,743	1440
	SSI	0,70	0,48	3,87E-03	2,743	1425

Tabla XVI: Correlación entre frecuencias y saturación del suelo a 10m

		Saturación del Suelo a 20m (%)				
		R	R2	A (hz/%)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	0,51	0,26	2,40E-03	2,072	915
	SSI	0,59	0,34	3,25E-03	2,018	1140
f2	PSD	0,50	0,25	2,13E-03	2,479	240
	SSI	0,53	0,28	2,38E-03	2,463	240
f3	PSD	0,57	0,32	3,37E-03	2,749	300
	SSI	0,60	0,36	3,87E-03	2,718	195

Tabla XVII: Correlación entre frecuencias y saturación del suelo a 20m

De las tablas se observa que los valores de los coeficientes A y B en todos los casos son el mismo o muy cercanos al comparar los resultados de las frecuencias obtenidas con el método PSD y SSI, lo mismo que con el lack asociado a la mejor correlación, por lo tanto el análisis multivariable se realizará solamente con los valores de obtenidos por el método SSI, por ser estos más precisos y presentar mejores correlaciones individuales con las variables ambientales.

De acuerdo a 2.2.1, donde el valor del estadístico R2 es menor que 0,30 no se considera que la variable ambiental en cuestión es influyente en la obtención de la variación de la frecuencia asociada a dicha correlación. Aunque para algunas frecuencias las variables ambientales presenten valores menores a 0,30 en el R2, si para alguna de ellas el valor es mayor, se usará de todas maneras. Por lo tanto en un principio se usarán las siguientes variables ambientales:

- Temperatura
- Humedad Relativa del Aire
- Presión Atmosférica
- Saturación del Suelo a 10m
- Saturación del Suelo a 20m

No obstante la selección anterior, en la tabla XVIII se muestra todas las correlaciones entre variables ambientales.

	Temp Aire	Hum. Rel.	Rad. Solar	Pres. Atm.	Preci p.	Viento			Sat. Suelo		
						Máx.	Prom	Dir.	10m	20m	
Temp. Aire	1	-0,84	0,65	-0,61	-0,08	0,59	0,51	0,14	-0,59	-0,46	
Hum. Rel.	-0,84	1	-0,57	0,46	0,00	-0,50	-0,44	-0,10	0,47	0,38	
Rad. Solar	0,65	-0,57	1	-0,24	-0,23	0,45	0,33	0,13	-0,37	-0,29	
Pres. Atm.	-0,61	0,46	-0,24	1	-0,32	-0,23	-0,23	-0,11	0,51	0,42	
Precip.	-0,08	0,00	-0,23	-0,32	1	0,24	0,21	0,00	0,11	-0,04	
Viento	Máx.	0,59	-0,50	0,45	-0,23	0,24	1	0,91	0,07	-0,24	-0,19
	Prom.	0,51	-0,44	0,33	-0,23	0,21	0,91	1	0,09	-0,22	-0,18
	Dir.	0,14	-0,10	0,13	-0,11	0,00	0,07	0,09	1	-0,12	-0,08
Sat. S.	10m	-0,59	0,47	-0,37	0,51	0,11	-0,24	-0,22	-0,12	1	0,79
	20m	-0,46	0,38	-0,29	0,42	-0,04	-0,19	-0,18	-0,08	0,79	1

Tabla XVIII: Correlación entre variables ambientales

	Temp Aire	Hum. Rel.	Rad. Solar	Pres. Atm.	Preci p.	Viento			Sat. Suelo		
						Máx.	Prom	Dir.	10m	20m	
Temp. Aire	1	0,70	0,42	0,37	0,01	0,35	0,26	0,02	0,35	0,21	
Hum. Rel.	0,70	1	0,33	0,21	0,00	0,25	0,19	0,01	0,22	0,14	
Rad. Solar	0,42	0,33	1	0,06	0,05	0,20	0,11	0,02	0,14	0,08	
Pres. Atm.	0,37	0,21	0,06	1	0,11	0,05	0,05	0,01	0,26	0,17	
Precip.	0,01	0,00	0,05	0,11	1	0,06	0,04	0,00	0,01	0,00	
Viento	Máx.	0,35	0,25	0,20	0,05	0,06	1	0,83	0,01	0,06	0,04
	Prom.	0,26	0,19	0,11	0,05	0,04	0,83	1	0,01	0,05	0,03
	Dir.	0,02	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	1	0,01	0,01
Sat. S.	10m	0,35	0,22	0,14	0,26	0,01	0,06	0,05	0,01	1	0,63
	20m	0,21	0,14	0,08	0,17	0,00	0,04	0,03	0,01	0,63	1

Tabla XIX: Estadístico R² entre variables ambientales

En la tabla XIX se han marcado en negrita los valores donde el estadístico R² es mayor que 0,6. Según 2.2.1 se elegirá para el análisis multivariable solo una de las variables que presentan alta correlación, siendo la elegida la de mayor correlación individual con las frecuencias.

Finalmente, se usarán las siguientes variables ambientales para el análisis multivariable:

- Temperatura
- Presión Atmosférica
- Saturación del Suelo a 10m

Gráficamente se puede observar que las frecuencias modales 1, 2 y 3 tienen cierta dependencia con los valores de estas variables ambientales. Debido a la gran cantidad de puntos solo se muestran promedios de datos en torno a algunos puntos para una mejor visibilidad.

En las figuras 68 a 76 se muestran valores promedios en torno a los puntos elegidos del eje X, así como los valores mínimos y máximos en torno a los mismos puntos para tener una idea de la dispersión que tienen los datos dinámicos.

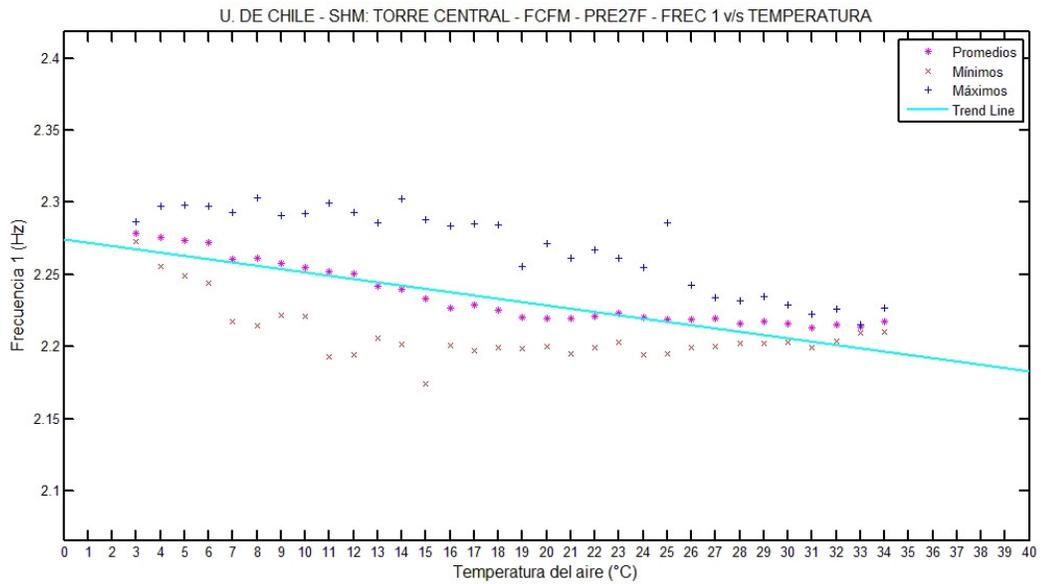


Figura 68: Frecuencia 1 v/s Temperatura

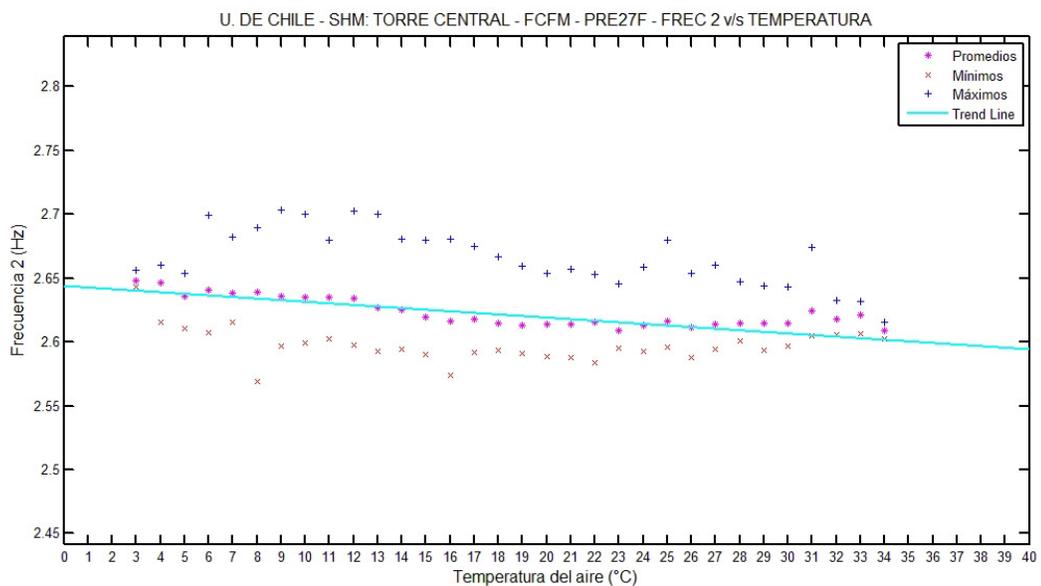


Figura 69: Frecuencia 2 v/s Temperatura

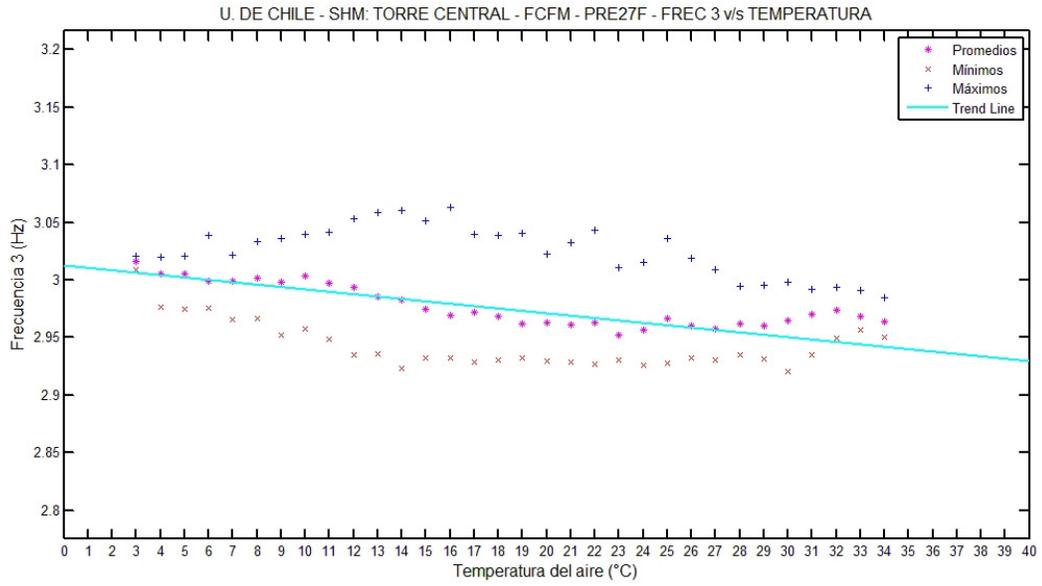


Figura 70: Frecuencia 3 v/s Temperatura

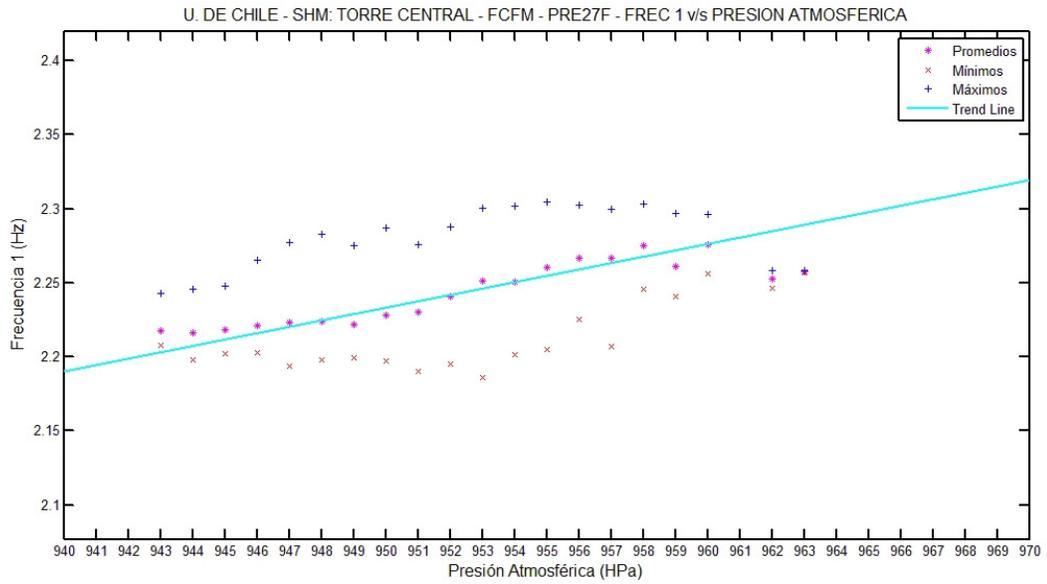


Figura 71: Frecuencia 1 v/s Presión Atmosférica

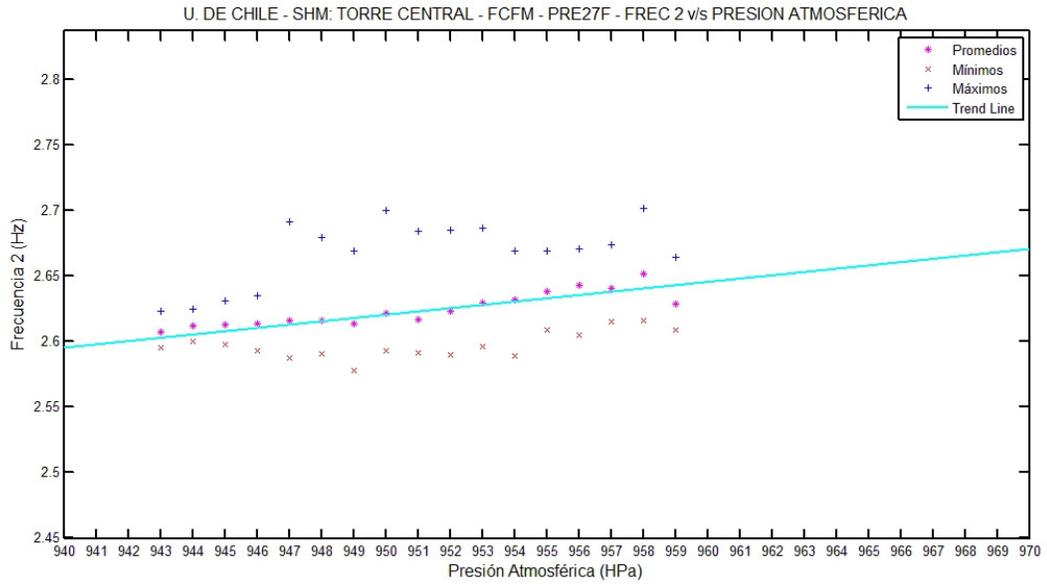


Figura 72: Frecuencia 2 v/s Presión Atmosférica

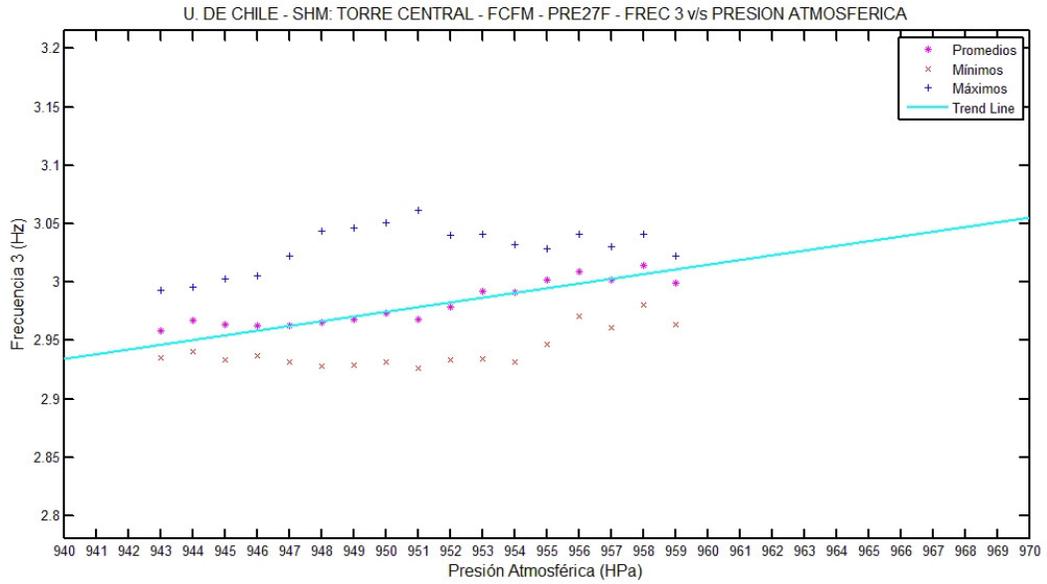


Figura 73: Frecuencia 3 v/s Presión Atmosférica

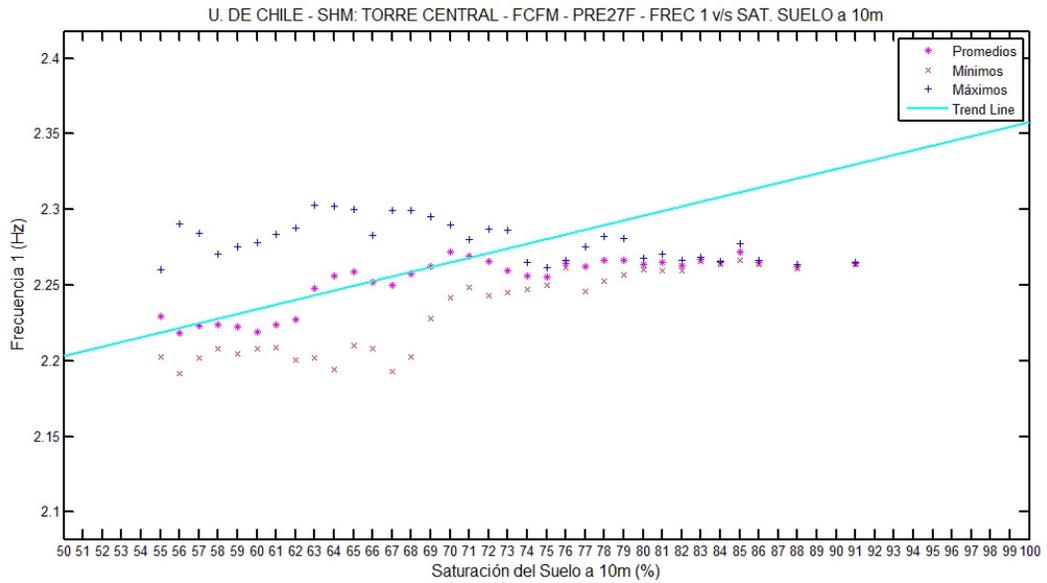


Figura 74: Frecuencia 1 v/s Saturación del Suelo a 10m

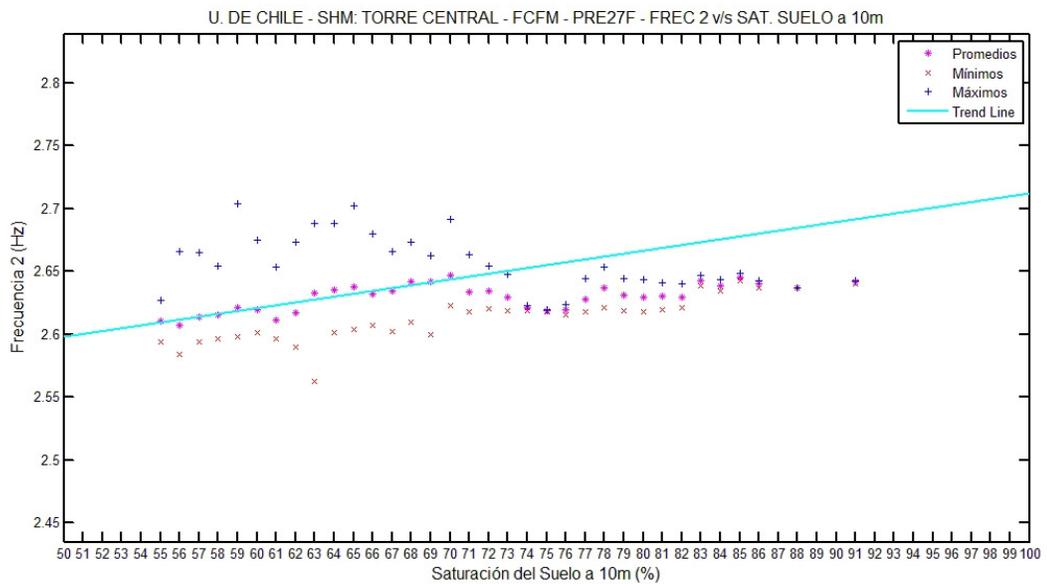


Figura 75: Frecuencia 2 v/s Saturación del Suelo a 10m

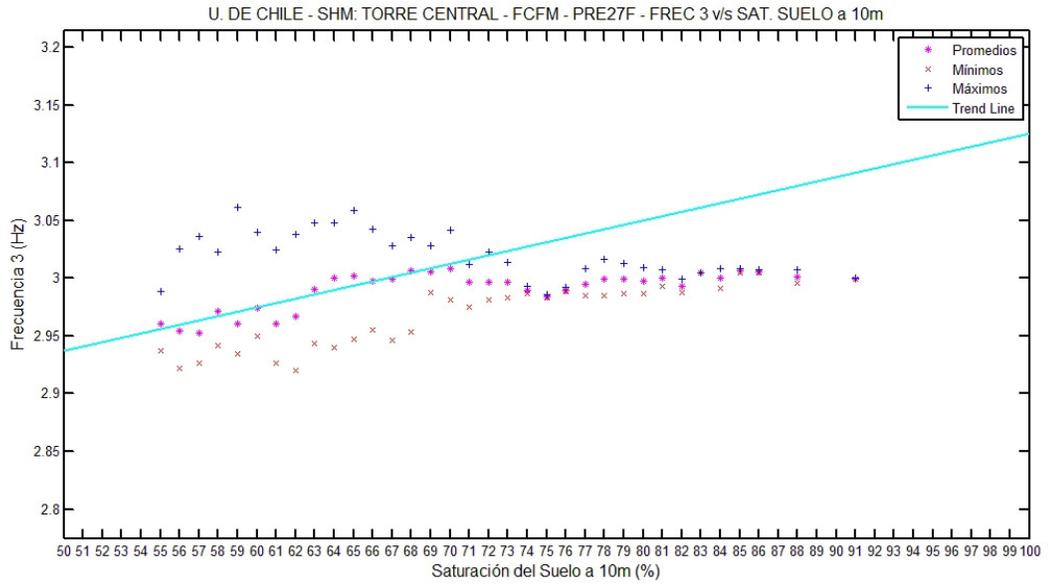


Figura 76: Frecuencia 3 v/s Saturación del Suelo a 10m

4.4.2. REGRESIÓN MULTIVARIABLE

Del punto anterior se desprende que una buena estimación de las frecuencias puede obtenerse al hacer una regresión lineal múltiple en que cada frecuencia depende linealmente de los valores de las 3 variables ambientales seleccionadas.

A fin de conseguir los mejores resultados posibles se consideran los desfases en el tiempo asociados a las mejores correlaciones encontradas en el punto anterior. Cabe notar que, en general, los desfases en el tiempo no son los mismos para todas las variables ambientales, por lo que se debe mover las series de tiempo por separado a fin de ajustarlas.

Para tener un punto de comparación se realiza el análisis multivariable con otras 3 variables adicionales: Humedad Relativa del Aire, Radiación Solar y Saturación del Suelo a 20m. La solución A es la que incluye solo las 3 variables ambientales del punto anterior y la solución B incluye, además, estas 3 últimas variables.

		b ₀	Temp.	Hum.	Rad.	Pres.	S.S. 10m	S.S. 20m	R ²
			b ₁ (hz/°C)	b ₂ (hz/%)	b ₃ (hz/W/m ²)	b ₄ (hz/HPa)	b ₅ (hz/%)	b ₆ (hz/%)	
Sol. A	f1	1,184	-1,72E-03			1,05E-03	1,35E-03		0,69
	f2	1,971	-8,00E-04			6,05E-04	1,48E-03		0,47
	f3	1,768	-1,49E-03			1,16E-03	2,11E-03		0,62
Sol. B	f1	1,730	-1,68E-03	1,41E-04	6,32E-06	4,43E-04	9,82E-04	7,03E-04	0,69
	f2	2,205	-8,64E-05	3,08E-04	-7,70E-06	3,16E-04	1,12E-03	5,54E-04	0,55
	f3	2,144	-1,43E-03	4,12E-05	-1,13E-05	7,27E-04	1,52E-03	1,14E-03	0,67

Tabla XX: Resultados de regresión multivariable

El resto de las variables ambientales no se han considerado pues su correlación con las variables dinámicas es muy baja.

Como era de esperarse el valor del estadístico R² aumenta al aumentar la cantidad de variables ambientales o independientes. No obstante dicho aumento no es tan grande como para justificar su uso en un modelo predictivo.

4.5. ANÁLISIS DE LOS DATOS POSTERIORES AL SISMO DEL 27F

4.5.1. CORRELACIONES INDIVIDUALES

En este caso no se consideraron todos los datos, sino desde el 1 de septiembre de 2010, debido al leve aumento de la rigidez no atribuible a las condiciones climáticas observado en los meses posteriores al terremoto. Se realiza el mismo procedimiento que en el caso anterior:

		Temperatura (°C)				
		R	R2	A (hz/°C)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	-0,69	0,47	-1,84E-03	1,940	150
	SSI	-0,66	0,44	-1,77E-03	1,937	195
f2	PSD	-0,48	0,23	-1,37E-03	2,343	1110
	SSI	-0,51	0,26	-1,67E-03	2,346	1155
f3	PSD	-0,50	0,25	-2,37E-03	2,771	1125
	SSI	-0,50	0,25	-2,34E-03	2,771	1125

Tabla XXI: Correlación entre frecuencias y temperatura

		Humedad Relativa del aire (%)				
		R	R2	A (hz/%)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	0,51	0,26	4,37E-04	1,886	1440
	SSI	0,48	0,23	4,08E-04	1,885	210
f2	PSD	0,35	0,12	3,20E-04	2,303	1110
	SSI	0,38	0,15	3,98E-04	2,297	1140
f3	PSD	0,32	0,10	4,76E-04	2,707	1095
	SSI	0,31	0,10	4,64E-04	2,708	1095

Tabla XXII: Correlación entre frecuencias y humedad relativa del aire

		Radiación Solar (W/m ²)				
		R	R2	A (hz/W/m ²)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	-0,51	0,26	-3,64E-05	1,916	285
	SSI	-0,49	0,24	-3,61E-05	1,914	285
f2	PSD	-0,45	0,20	-3,51E-05	2,328	1260
	SSI	-0,49	0,24	-4,62E-05	2,328	1290
f3	PSD	-0,46	0,21	-6,00E-05	2,743	1350
	SSI	-0,46	0,21	-5,95E-05	2,743	1335

Tabla XXIII: Correlación entre frecuencias y radiación solar

		Presión Atmosférica (hPa)				
		R	R2	A (hz/hPa)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	0,49	0,24	2,70E-03	-0,663	60
	SSI	0,49	0,24	2,75E-03	-0,709	30
f2	PSD	0,40	0,16	2,33E-03	0,107	1050
	SSI	0,42	0,18	2,82E-03	-0,370	1065
f3	PSD	0,46	0,21	4,49E-03	-1,540	1170
	SSI	0,47	0,22	4,51E-03	-1,563	1170

Tabla XXIV: Correlación entre frecuencias y presión atmosférica

		Precipitaciones (mm)				
		R	R2	A (hz/mm)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	0,14	0,02	7,19E-03	1,929	840
	SSI	0,17	0,03	8,62E-03	1,928	705
f2	PSD	0,15	0,02	6,49E-03	2,338	735
	SSI	0,18	0,03	1,17E-02	2,335	255
f3	PSD	0,08	0,01	5,09E-03	2,750	480
	SSI	0,09	0,01	6,04E-03	2,749	450

Tabla XXV: Correlación entre frecuencias y precipitaciones

		Velocidad del Viento Máxima (m/s)				
		R	R2	A (hz/m/s)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	-0,40	0,16	-3,63E-03	1,919	75
	SSI	-0,38	0,15	-3,47E-03	1,917	90
f2	PSD	-0,34	0,11	-3,23E-03	2,329	1110
	SSI	-0,41	0,16	-4,39E-03	2,330	1155
f3	PSD	-0,41	0,17	-6,52E-03	2,749	1095
	SSI	-0,42	0,17	-6,54E-03	2,749	1095

Tabla XXVI: Correlación entre frecuencias y velocidad máxima del viento

		Velocidad del Viento Promedio (m/s)				
		R	R2	A (hz/m/s)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	-0,35	0,12	-1,06E-02	1,917	15
	SSI	-0,33	0,11	-1,01E-02	1,915	90
f2	PSD	-0,27	0,07	-8,98E-03	2,327	1095
	SSI	-0,34	0,11	-1,25E-02	2,327	1155
f3	PSD	-0,35	0,12	-1,91E-02	2,746	1095
	SSI	-0,35	0,13	-1,92E-02	2,746	1095

Tabla XXVII: Correlación entre frecuencias y velocidad media del viento

		Dirección del Viento (°)				
		R	R2	A (hz/°)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	-0,17	0,03	-4,43E-05	1,920	375
	SSI	-0,16	0,03	-4,48E-05	1,918	300
f2	PSD	-0,13	0,02	-3,70E-05	2,329	615
	SSI	-0,15	0,02	-4,54E-05	2,328	600
f3	PSD	-0,10	0,01	-4,77E-05	2,744	1335
	SSI	-0,10	0,01	-4,82E-05	2,744	1365

Tabla XXVIII: Correlación entre frecuencias y dirección del viento

		Saturación del Suelo a 10m (%)				
		R	R2	A (hz/%)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	0,25	0,06	5,46E-03	1,613	105
	SSI	0,23	0,05	5,19E-03	1,625	60
f2	PSD	0,26	0,07	5,45E-03	2,027	105
	SSI	0,23	0,05	6,17E-03	1,986	15
f3	PSD	0,27	0,07	9,59E-03	2,212	330
	SSI	0,28	0,08	1,01E-02	2,184	0

Tabla XXIX: Correlación entre frecuencias y saturación del suelo a 10m

		Saturación del Suelo a 20m (%)				
		R	R2	A (hz/%)	B (hz)	lack (min)
f1	PSD	0,10	0,01	6,30E-04	1,871	0
	SSI	0,09	0,01	5,80E-04	1,872	15
f2	PSD	0,10	0,01	5,96E-04	2,286	105
	SSI	0,08	0,01	7,25E-04	2,277	15
f3	PSD	0,10	0,01	9,52E-04	2,676	300
	SSI	0,09	0,01	8,76E-04	2,682	1440

Tabla XXX: Correlación entre frecuencias y saturación del suelo a 20m

En este caso hay, en general, correlaciones menores entre las variables ambientales y las frecuencias estudiadas, como es el caso que solo la temperatura tiene una correlación dentro de los límites aceptados según 2.2.1, para realizar el mismo estudio multivariable que en el caso anterior al terremoto del 27F se usarán las mismas variables.

En la tabla XXXI se muestra todas las correlaciones entre variables ambientales.

	Temp Aire	Hum. Rel.	Rad. Solar	Pres. Atm.	Preci p.	Viento			Sat. Suelo		
						Máx.	Prom	Dir.	10m	20m	
Temp. Aire	1	-0,82	0,62	-0,52	0,02	0,61	0,51	0,16	-0,25	-0,08	
Hum. Rel.	-0,82	1	-0,54	0,35	0,17	-0,49	-0,42	-0,10	0,10	0,05	
Rad. Solar	0,62	-0,54	1	-0,19	-0,10	0,43	0,30	0,11	-0,13	-0,02	
Pres. Atm.	-0,52	0,35	-0,19	1	-0,13	-0,22	-0,21	-0,08	0,26	0,13	
Precip.	0,02	0,17	-0,10	-0,13	1	0,14	0,13	-0,05	-0,08	-0,08	
Viento	Máx.	0,61	-0,49	0,43	-0,22	0,14	1	0,90	0,10	-0,12	0,00
	Prom.	0,51	-0,42	0,30	-0,21	0,13	0,90	1	0,11	-0,11	0,00
	Dir.	0,16	-0,10	0,11	-0,08	-0,05	0,10	0,11	1	-0,05	-0,02
Sat. S.	10m	-0,25	0,10	-0,13	0,26	-0,08	-0,12	-0,11	-0,05	1	0,52
	20m	-0,08	0,05	-0,02	0,13	-0,08	0,00	0,00	-0,02	0,52	1

Tabla XXXI: Correlación entre variables ambientales

	Temp Aire	Hum. Rel.	Rad. Solar	Pres. Atm.	Preci p.	Viento			Sat. Suelo		
						Máx.	Prom	Dir.	10m	20m	
Temp. Aire	1	0,67	0,39	0,27	0,00	0,37	0,26	0,03	0,06	0,01	
Hum. Rel.	0,67	1	0,29	0,12	0,03	0,24	0,18	0,01	0,01	0,00	
Rad. Solar	0,39	0,29	1	0,04	0,01	0,18	0,09	0,01	0,02	0,00	
Pres. Atm.	0,27	0,12	0,04	1	0,02	0,05	0,04	0,01	0,07	0,02	
Precip.	0,00	0,03	0,01	0,02	1	0,02	0,02	0,00	0,01	0,01	
Viento	Máx.	0,37	0,24	0,18	0,05	0,02	1	0,82	0,01	0,01	0,00
	Prom.	0,26	0,18	0,09	0,04	0,02	0,82	1	0,01	0,01	0,00
	Dir.	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	1	0,00	0,00
Sat. S.	10m	0,06	0,01	0,02	0,07	0,01	0,01	0,01	0,00	1	0,27
	20m	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,27	1

Tabla XXXII: Estadístico R² entre variables ambientales

En las figuras 77 a 85 se muestran valores promedios en torno a los puntos elegidos del eje X, así como los valores mínimos y máximos en torno a los mismos puntos para tener una idea de la dispersión que tienen los datos dinámicos.

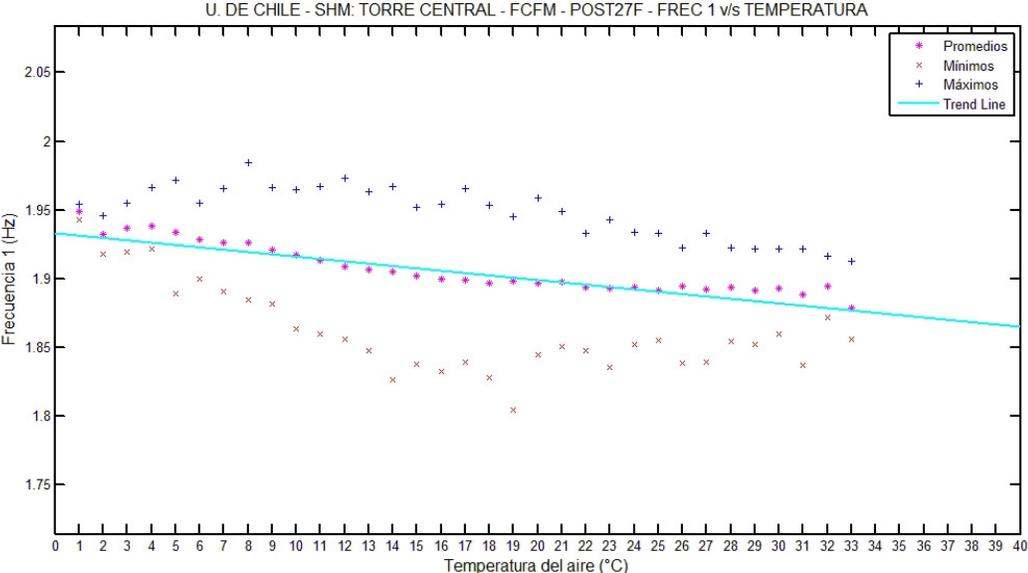


Figura 77: Frecuencia 1 v/s Temperatura

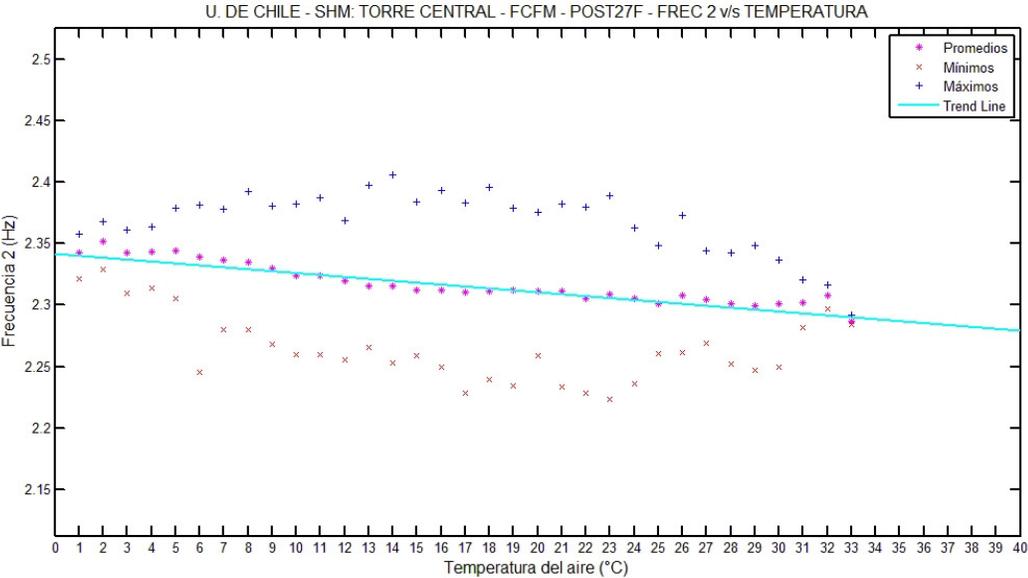


Figura 78: Frecuencia 2 v/s Temperatura

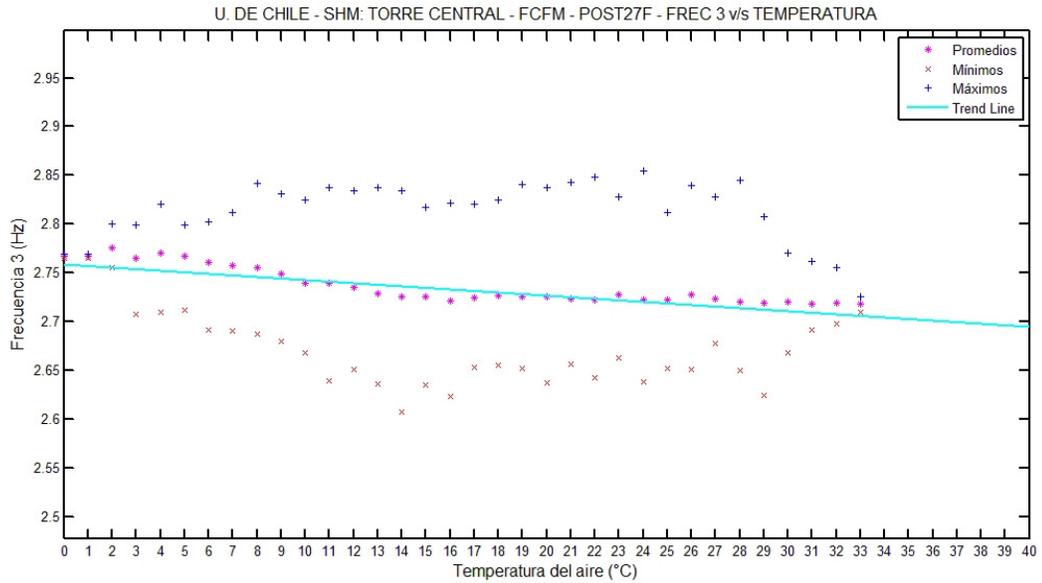


Figura 79: Frecuencia 3 v/s Temperatura

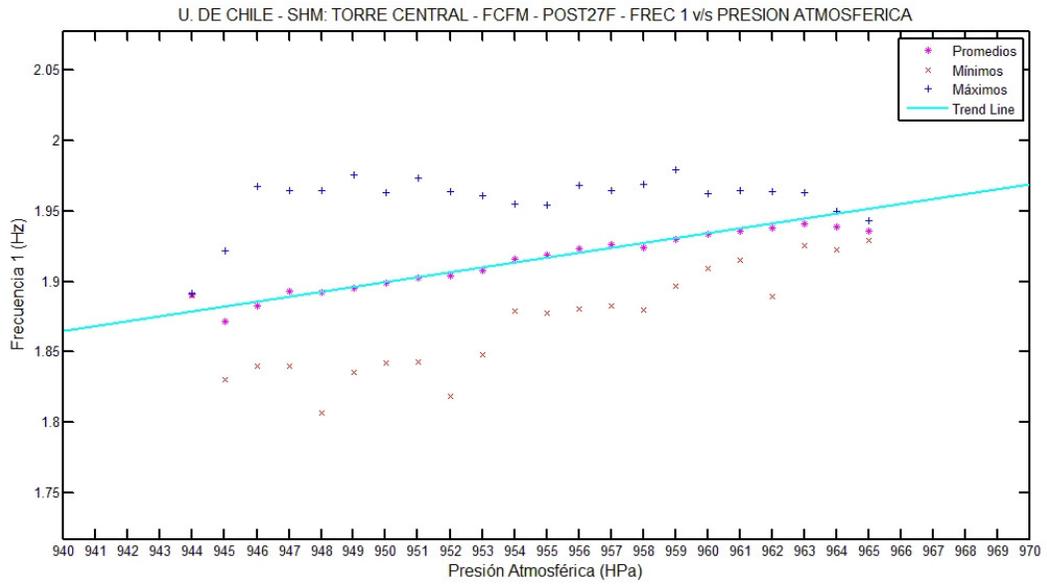


Figura 80: Frecuencia 1 v/s Presión Atmosférica

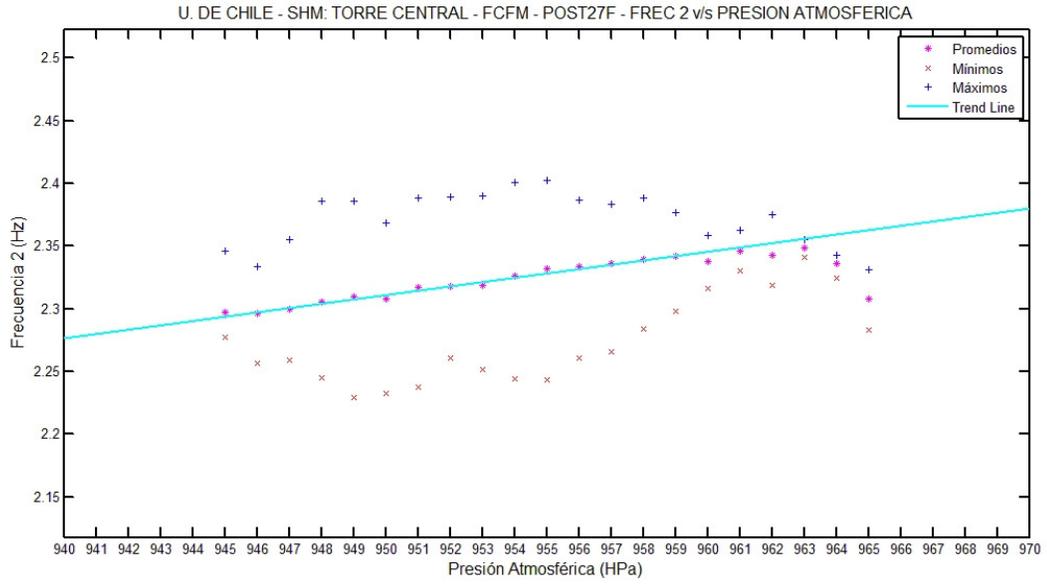


Figura 81: Frecuencia 2 v/s Presión Atmosférica

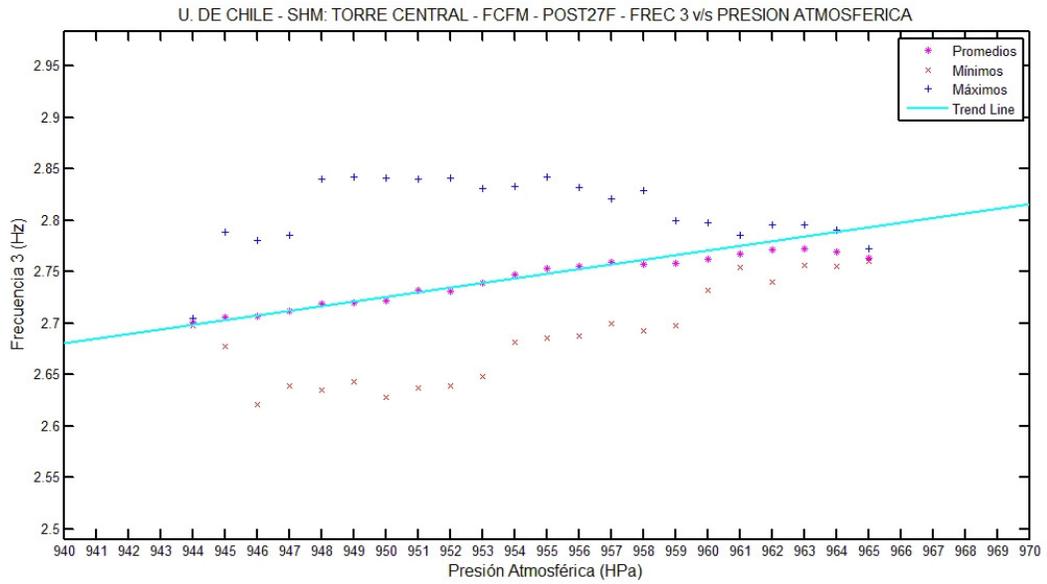


Figura 82: Frecuencia 3 v/s Presión Atmosférica

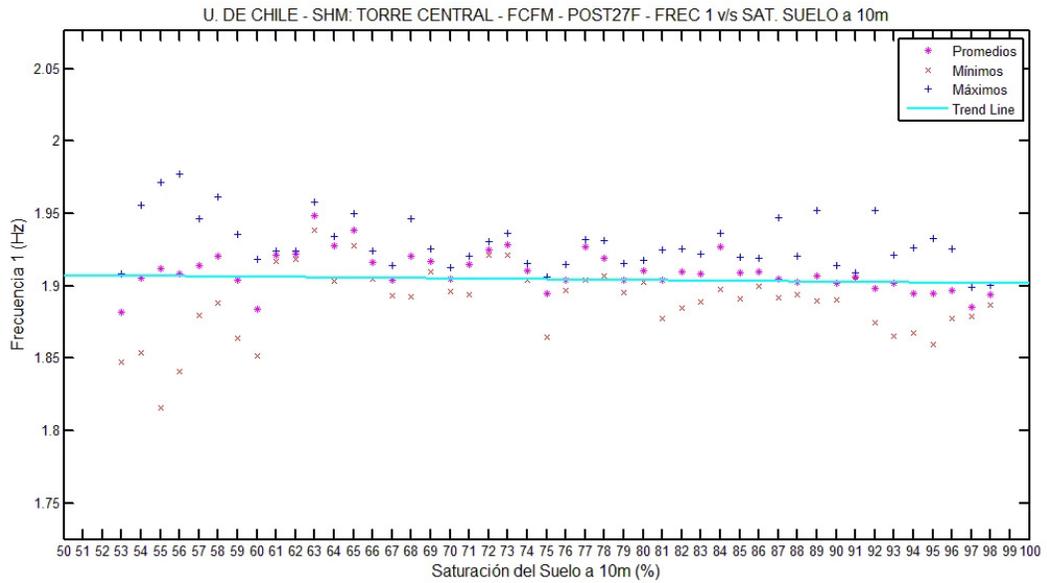


Figura 83: Frecuencia 1 v/s Saturación del Suelo a 10m

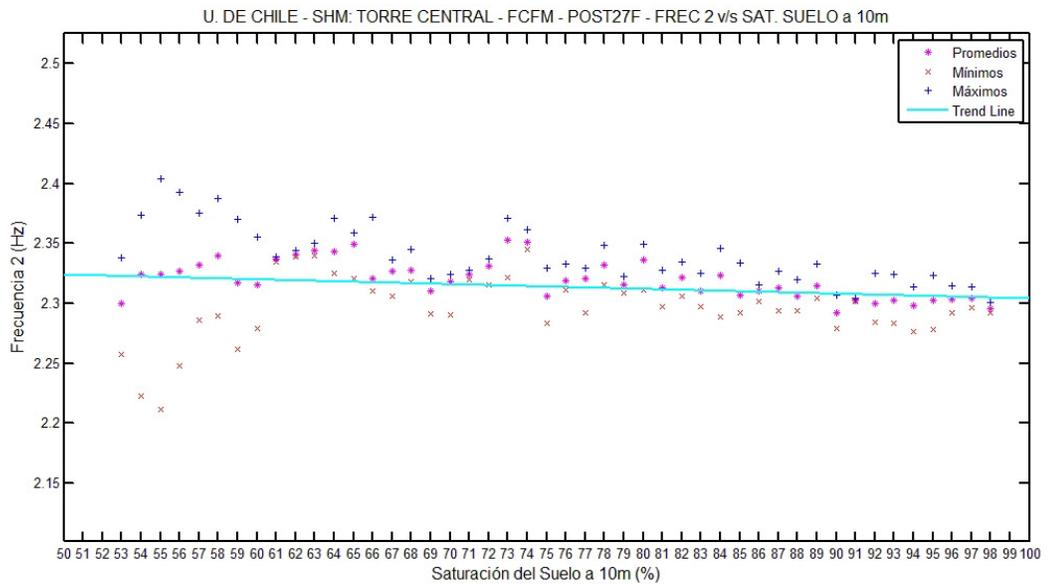


Figura 84: Frecuencia 2 v/s Saturación del Suelo a 10m

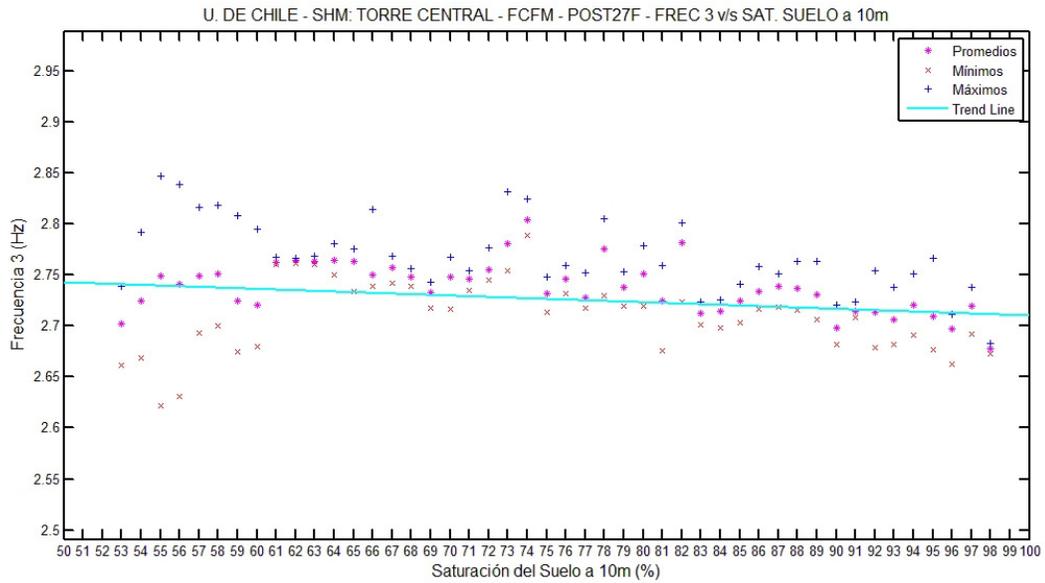


Figura 85: Frecuencia 3 v/s Saturación del Suelo a 10m

4.5.2. REGRESIÓN MULTIVARIABLE

Siguiendo el mismo procedimiento del punto 4.4.2, se analizan 2 soluciones, con las mismas variables que en el caso anterior.

		b_0	Temp.	Hum.	Rad.	Pres.	S.S. 10m	S.S. 20m	R^2
			b_1 (hz/°C)	b_2 (hz/%)	b_3 (hz/W/m ²)	b_4 (hz/HPa)	b_5 (hz/%)	b_6 (hz/%)	
Sol. A	f1	0,354	-1,74E-03			1,65E-03	1,54E-04		0,45
	f2	0,439	-1,53E-03			2,01E-03	-1,07E-04		0,37
	f3	-0,343	-2,12E-03			3,28E-03	-2,26E-04		0,39
Sol. B	f1	1,278	-3,17E-03	-3,35E-04	1,16E-05	7,17E-04	1,99E-04	3,57E-05	0,50
	f2	1,325	-2,82E-03	-2,30E-04	-1,19E-06	1,12E-03	5,85E-05	-2,61E-04	0,45
	f3	0,631	-3,79E-03	-4,98E-04	-6,95E-06	2,32E-03	-2,17E-04	-8,57E-05	0,48

Tabla XXXIII: Resultados de regresión multivariable

Nuevamente el valor del estadístico R2 aumenta al aumentar la cantidad de variables ambientales o independientes, pero esta vez se alcanzan niveles de certeza menores en ambas soluciones

5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Se aprecia que la variación de las frecuencias modales debido al terremoto del 27 de febrero de 2010 es mayor a la variación observada en cada período que es atribuible a fenómenos ambientales, siendo entre 1,5 y 2 veces aproximadamente la variación debido a las condiciones ambientales.

Las variaciones debido al ambiente se deben principalmente a los cambios de temperatura y presión atmosférica, observándose que a mayor temperatura y menor presión las frecuencias tienden a disminuir, lo que resulta bastante lógico, pues naturalmente se asume que las cosas frías son más rígidas que las cálidas.

El análisis multivariable realizado se ha hecho considerando un “lack” de tiempo distinto para cada variable ambiental, esto arroja como resultado que las fórmulas encontradas dependen de varios instantes anteriores. A continuación se muestran dichas fórmulas como expresiones algebraicas:

Estudio de datos previos al 27F

Sol. A:
$$f_{1i} = 1,184 - 1,72 \cdot 10^{-3} \cdot T_{i-13} + 1,05 \cdot 10^{-3} \cdot P_{i-10} + 1,35 \cdot 10^{-3} \cdot S10_{i-60}$$

$$f_{2i} = 1,971 - 8,00 \cdot 10^{-4} \cdot T_{i-73} + 6,05 \cdot 10^{-4} \cdot P_{i-68} + 1,48 \cdot 10^{-3} \cdot S10_{i-96}$$

$$f_{3i} = 1,768 - 1,49 \cdot 10^{-3} \cdot T_{i-81} + 1,16 \cdot 10^{-3} \cdot P_{i-78} + 2,11 \cdot 10^{-3} \cdot S10_{i-95}$$

Sol. B:
$$f_{1i} = 1,730 - 1,68 \cdot 10^{-3} \cdot T_{i-13} + 1,41 \cdot 10^{-4} \cdot H_{i-12} + 6,32 \cdot 10^{-6} \cdot R_{i-20} + \dots$$
$$4,43 \cdot 10^{-4} \cdot P_{i-10} + 9,82 \cdot 10^{-4} \cdot S10_{i-60} + 7,03 \cdot 10^{-4} \cdot S20_{i-76}$$

$$f_{2i} = 2,205 - 8,64 \cdot 10^{-5} \cdot T_{i-73} + 3,08 \cdot 10^{-4} \cdot H_{i-72} - 7,70 \cdot 10^{-6} \cdot R_{i-85} + \dots$$
$$3,16 \cdot 10^{-4} \cdot P_{i-68} + 1,12 \cdot 10^{-3} \cdot S10_{i-96} + 5,54 \cdot 10^{-4} \cdot S20_{i-16}$$

$$f_{3i} = 2,144 - 1,43 \cdot 10^{-3} \cdot T_{i-81} + 4,12 \cdot 10^{-5} \cdot H_{i-80} - 1,13 \cdot 10^{-5} \cdot R_{i-92} + \dots$$
$$7,27 \cdot 10^{-4} \cdot P_{i-78} + 1,52 \cdot 10^{-3} \cdot S10_{i-95} + 1,14 \cdot 10^{-3} \cdot S20_{i-13}$$

Estudio de datos posteriores al 27F

Sol. A:

$$f_{1i} = 0,354 - 1,74 \cdot 10^{-3} \cdot T_{i-13} + 1,65 \cdot 10^{-3} \cdot P_{i-2} + 1,54 \cdot 10^{-4} \cdot S10_{i-4}$$
$$f_{2i} = 0,439 - 1,53 \cdot 10^{-3} \cdot T_{i-77} + 2,01 \cdot 10^{-3} \cdot P_{i-71} - 1,07 \cdot 10^{-4} \cdot S10_{i-1}$$
$$f_{3i} = -0,343 - 2,12 \cdot 10^{-3} \cdot T_{i-75} + 3,28 \cdot 10^{-3} \cdot P_{i-72} - 2,26 \cdot 10^{-4} \cdot S10_i$$

Sol. B:

$$f_{1i} = 1,278 - 3,17 \cdot 10^{-3} \cdot T_{i-13} - 3,35 \cdot 10^{-4} \cdot H_{i-14} + 1,16 \cdot 10^{-5} \cdot R_{i-19} + \dots$$
$$7,17 \cdot 10^{-4} \cdot P_{i-2} + 1,99 \cdot 10^{-4} \cdot S10_{i-4} + 3,57 \cdot 10^{-5} \cdot S20_{i-1}$$
$$f_{2i} = 1,325 - 2,82 \cdot 10^{-3} \cdot T_{i-77} - 2,30 \cdot 10^{-4} \cdot H_{i-76} - 1,19 \cdot 10^{-6} \cdot R_{i-86} + \dots$$
$$1,12 \cdot 10^{-3} \cdot P_{i-71} + 5,85 \cdot 10^{-5} \cdot S10_{i-1} - 2,61 \cdot 10^{-4} \cdot S20_{i-1}$$
$$f_{3i} = 0,631 - 3,79 \cdot 10^{-3} \cdot T_{i-75} - 4,98 \cdot 10^{-4} \cdot H_{i-73} - 6,95 \cdot 10^{-6} \cdot R_{i-89} + \dots$$
$$2,32 \cdot 10^{-3} \cdot P_{i-78} - 2,17 \cdot 10^{-4} \cdot S10_i - 8,57 \cdot 10^{-5} \cdot S20_{i-96}$$

En vista de los resultados obtenidos, se desprende que aunque pueden relacionarse las variaciones de la rigidez del edificio con las condiciones climáticas, estas variables solo explican una fracción de dicha variación, por lo que pudieran existir otras causas de como la variación en la carga del edificio, el tránsito de vehículos en calles cercanas y de personas dentro y fuera del edificio además de otras variables ambientales no consideradas en este estudio.

Aunque la estimación de las frecuencias mejora al agregar más variables ambientales, no es recomendable usar muchas, por la dificultad que representa obtener estos datos en tiempos diferentes, además la mejora en la calidad de la predicción no es lo bastante grande como para estimular el uso de más variables.

Para investigaciones futuras pueden considerarse los siguientes factores:

- La saturación del suelo depende de la lluvia acumulada en los días previos, por lo tanto una mejor apreciación de la influencia de las precipitaciones se hará al estudiar el efecto de la lluvia acumulada, en lugar de las precipitaciones de los últimos 15 minutos.
- Estudiar la relación entre un conjunto de variables ambientales con un mismo desfase de tiempo con cada variable dinámica, para una mayor facilidad en la obtención de datos.

6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Alejandro Elías Castillo Montes, “*Identificación de las propiedades modales de edificios altos utilizando el método del subespacio estocástico*”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Santiago, Chile, 2005.
- [2] Tomás Renato Núñez Acuña, “*Variación debido a cambios de masa y rigidez de las propiedades dinámicas de una estructura en proceso constructivo*”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil y al grado de Magister en Ciencias, Mención Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile. Santiago, Chile, 2009.
- [3] Patricio Andrés Lazcano Corvalán, “*Variación de los parámetros modales del edificio de la Cámara Chilena de la Construcción a partir de registros ambientales y sísmicos*”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Santiago, Chile, 2008.
- [4] José Tomás Yáñez Celedón, “*Implementación de un sistema de monitoreo continuo de parámetros dinámicos de un edificio de muros*”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Santiago, Chile, 2009.
- [5] Rodrigo Patricio Carreño Vallejos, “*Variación de propiedades dinámicas del edificio de la Cámara Chilena de la Construcción: Caso sísmico*”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Santiago, Chile, 2009.
- [6] José Luis Caroca Gaete, “*Desarrollo e implementación de un sistema de detección de daño estructural*”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil y al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile. Santiago, Chile, 2012.
- [7] Clinton, Bradford, Heaton, Favela. (2006) “*The Observed Wander of the Natural Frequencies in a Structure*”. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.96, February 2006.
- [8] Ka-Veng Yuen, Sin-Chi Kouk, “*Ambient interference in long-term monitoring of buildings*”. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Macau, Macao, 2010.
- [9] Bendat J. and A. Piersol. “*Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*”. John Wiley & Sons, Inc. 1980.
- [10] Brigham O. “*The Fast Fourier Transform*”. Prentice Hall, 1974.
- [11] Chopra A. K. “*Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*”. University of California at Berkeley. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1995.
- [12] Greene, W H. “*Econometric Analysis*”. 5th Edition, Chapter 14, New Jersey, 2002.
- [13] Jorgensen, B. “*The Theory of Linear Models*”. Chapman & Hall, New York, 1993.