



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

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE EN LA INFLUENCIA DE LOS  
PARÁMETROS AMBIENTALES EN LA RESPUESTA MODAL DE EDIFICIOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JAVIER ALEJANDRO RAMÍREZ GONZÁLEZ

PROFESOR GUIA:  
RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RAFAEL AGUILAR VELEZ  
CARLOS VENTURA ZAMORA

SANTIAGO DE CHILE  
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: JAVIER RAMÍREZ G.  
FECHA: 03/07/2020  
PROF. GUÍA: RUBÉN BOROSCHEK K.

## **REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE EN LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS AMBIENTALES EN LA RESPUESTA MODAL DE EDIFICIOS**

Diversos estudios han logrado identificar que las frecuencias modales de las obras civiles no son constantes en el tiempo, sino que presentan variaciones según diversos factores externos aún en ausencia de daño. En particular, se ha determinado que una fuente de variación importante de las frecuencias modales son los efectos del medio ambiente, tal como la temperatura ambiental, la humedad relativa del aire, la humedad del suelo, etc. En las últimas décadas se ha estudiado el comportamiento de las frecuencias modales respecto a los parámetros ambientales, sin embargo, el funcionamiento de este mecanismo aún no ha sido comprendido en su totalidad.

La presente memoria busca estudiar esta variación mediante la descomposición de las variables ambientales y de frecuencia modal en sus componentes de largo plazo (variación anual o estacional) y de variación de corto plazo (variación diaria). Esto con el fin de poder comparar cada uno de estos comportamientos de manera separada, permitiendo obtener mayor claridad de resultados sobre estos fenómenos.

Se cuenta con data de 6 estructuras distintas y de diferentes materiales de construcción. Para cada una, se tienen registros ambientales (temperatura y humedad absoluta) y registros de frecuencias modales. Esta data es separada mediante un filtrado estacional y diario. Se establecen los patrones que relacionan las variables diarias y estacionales.

Se concluye que existe una relación clara con las variables externas y las propiedades modales, donde se identifican variaciones producto a la estación de entre un 2% a 4%, así como variaciones asociadas al efecto diario de un 0.5% a un 1.0%. Ambos mecanismos de variación (estacional y diario) presentan diferentes comportamientos según la estación del año (en particular, para verano e invierno). Dependiendo del tipo de estructura y su material, estas variaciones no son instantáneas. Para las variaciones estacionales, el retardo es cero para la estructura de hormigón y de 1 a 2,5 meses para las estructuras de albañilería de adobe, mientras que para las variaciones diarias está del orden de 3 a 22 horas para la estructura de hormigón, y del orden de 10 a 25 horas para las estructuras de albañilería de adobe.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a las personas que estuvieron incondicionalmente a mi lado en todo esta etapa universitaria. Gracias a mi familia por creer en mí y apoyarme en todo lo que necesitara; gracias a mis amigos por siempre estar ahí y ayudarme a mantener la cabeza siempre arriba y feliz; y gracias a esas personas más cercanas a mí que hacen de mi vida la vida que es.

En particular, se agradece a todas las personas que hicieron esta memoria posible, donde su ayuda y participación en esta fue clave para poder hacerla realidad. En particular:

Se agradece encarecidamente a Rafael Aguilar y a Giacomo Zonno, por compartir y permitir el uso de los datos modales y ambientales de la iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, la iglesia de San Juan Bautista de Huaro y los muros de albañilería de adobe de laboratorio de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Se agradece a Wladimir González, por compartir y permitir el uso de los registros modales para Torre Central, así como por realizar el procesamiento adicional de los registros modales, logrando extender el rango de datos disponibles hasta el año 2019.

Finalmente, agradecer a mi profesor guía, Rubén Boroschek, por toda la paciencia que me ha tenido, su buena disposición, y por mantener mi espíritu y motivación arriba ante las dificultades.

## TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1 : INTRODUCCIÓN .....	1
1.1    Objetivos .....	3
1.2    Metodología .....	3
Capítulo 2 : MARCO TEÓRICO .....	5
2.1    Mediciones Ambientales y Características.....	5
2.2    Mediciones de Frecuencia Modal y Características .....	6
2.3    Revisión Trabajos Anteriores.....	7
2.4    Transformada de Fourier .....	9
2.5    Filtrado de Componentes.....	10
Capítulo 3 : DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS A ANALIZAR .....	13
3.1    Torre Central .....	13
3.1.1.    Descripción General .....	13
3.1.2.    Condiciones Ambientales .....	14
3.1.3.    Registro Propiedades Modales.....	19
3.2    Iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas.....	23
3.2.1.    Descripción General .....	23
3.2.2.    Condiciones Ambientales .....	24
3.2.3.    Registro Propiedades Modales.....	28
3.3    Iglesia San Juan Bautista de Huaro.....	32
3.3.1.    Descripción General .....	32
3.3.2.    Condiciones Ambientales .....	33
3.3.3.    Registro Propiedades Modales.....	37
3.4    Muros de Adobe de Laboratorio .....	41
3.4.1.    Descripción General .....	41
3.4.2.    Condiciones Ambientales .....	42
3.4.3.    Registro Propiedades Modales – Muro tipo I .....	46
3.4.4.    Registro Propiedades Modales – Muro tipo II .....	49
3.4.5.    Registro Propiedades Modales – Muro tipo III .....	53
Capítulo 4 : FILTRADO DE COMPONENTES .....	57
4.1    Filtrado Aplicado a Data Experimental.....	57
4.1.1.    Procesamiento Previo .....	57
4.1.2.    Aplicación de la Transformada de Fourier .....	59



4.1.3.	Proceso de Filtrado de Componentes .....	59
4.2	Torre Central .....	59
4.2.1.	Temperatura Ambiental .....	59
4.2.2.	Humedad Absoluta .....	64
4.2.3.	Frecuencia Modal 1 .....	67
4.2.4.	Frecuencia Modal 2 .....	70
4.2.5.	Frecuencia Modal 3 .....	73
4.3	Estructuras Restantes.....	76
<b>Capítulo 5 : ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DIARIA Y ESTACIONAL.....</b>		<b>77</b>
5.1	Análisis del Ciclo Diario .....	77
5.2	Torre Central .....	81
5.2.1.	Análisis Estacional .....	81
5.2.2.	Análisis Diario .....	88
5.3	Iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas.....	96
5.3.1	Análisis Estacional .....	96
5.3.2	Análisis Diario .....	103
5.4	Iglesia de San Juan Bautista de Huaro.....	105
5.4.1.	Análisis Estacional .....	105
5.4.2.	Análisis Diario .....	112
5.5	Muros de Adobe de Laboratorio .....	114
5.5.1.	Análisis Estacional .....	114
5.5.2.	Análisis Diario – Muro tipo I .....	114
5.5.3.	Análisis Diario – Muro tipo II .....	119
5.5.4.	Análisis Diario – Muro tipo III .....	123
<b>Capítulo 6 : CONCLUSIONES .....</b>		<b>128</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>133</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>134</b>
A.	Anexos Capitulo 3.....	134
A.3.1.	Registros de Lluvia - Torre Central .....	134
A.3.2.	Registros de Lluvia - Iglesia Andahuaylillas.....	136
A.3.3.	Registros de Lluvia – Iglesia de Huaro.....	138
B.	Anexos Capitulo 4.....	140
A.4.1.	Torre Central – Componentes temperatura ambiental.....	140
A.4.2.	Torre Central – Componentes humedad absoluta .....	141

A.4.3. Torre Central – Componentes frecuencia modal 1.....	142
A.4.4. Torre Central – Componentes frecuencia modal 2.....	143
A.4.5. Torre Central – Componentes frecuencia modal 3.....	144
A.4.6. Iglesia Andahuaylillas – Filtrado Temperatura Ambiental.....	145
A.4.7. Iglesia Andahuaylillas – Filtrado Humedad Absoluta.....	146
A.4.8. Iglesia Andahuaylillas – Filtrado Frecuencia Modal 1.....	147
A.4.9. Iglesia Andahuaylillas – Filtrado Frecuencia Modal 2.....	148
A.4.10. Iglesia Andahuaylillas – Filtrado Frecuencia Modal 3.....	149
A.4.11. Iglesia de Huaro – Filtrado Temperatura Ambiental.....	150
A.4.12. Iglesia de Huaro – Filtrado Humedad Absoluta.....	151
A.4.13. Iglesia de Huaro – Filtrado Frecuencia Modal 1.....	152
A.4.14. Iglesia de Huaro – Filtrado Frecuencia Modal 2.....	153
A.4.15. Iglesia de Huaro – Filtrado Frecuencia Modal 3.....	154
A.4.16. Muro Tipo I, II y III – Filtrado Temperatura Ambiental.....	155
A.4.17. Muro Tipo I, II y III – Filtrado Humedad Absoluta.....	156
A.4.18. Muro Tipo I – Filtrado Frecuencia Modal 1.....	157
A.4.19. Muro Tipo I – Filtrado Frecuencia Modal 2.....	158
A.4.20. Muro Tipo I – Filtrado Frecuencia Modal 3.....	159
A.4.21. Muro Tipo I – Filtrado Frecuencia Modal 4.....	160
A.4.22. Muro Tipo II – Filtrado Frecuencia Modal 1.....	161
A.4.23. Muro Tipo II – Filtrado Frecuencia Modal 2.....	162
A.4.24. Muro Tipo II – Filtrado Frecuencia Modal 3.....	163
A.4.25. Muro Tipo III – Filtrado Frecuencia Modal 1.....	164
A.4.26. Muro Tipo III – Filtrado Frecuencia Modal 2.....	165
A.4.27. Muro Tipo III – Filtrado Frecuencia Modal 3.....	166
C. Anexos Capitulo 5.....	167
A.5.1. Torre Central – Desfase frecuencias modales, humedad absoluta.....	167
A.5.2. Iglesia Andahuaylillas – Comparación componente diaria, temperatura.....	169
A.5.3. Iglesia de Huaro – Comparación componente diaria, temperatura.....	170
A.5.4. Muro Tipo I – Comparación componente diaria, temperatura.....	171
A.5.5. Muro Tipo I – Desfase Componente Diaria, comparación frecuencias modales invertidas y no invertidas.....	172
A.5.6. Muro Tipo II – Comparación componente diaria, temperatura.....	175

A.5.7. Muro Tipo II – Desfase Componente Diaria, comparación frecuencias modales invertidas y no invertidas.....	176
A.5.8. Muro Tipo III – Comparación componente diaria, temperatura. ....	178
A.5.9. Muro Tipo III – Desfase Componente Diaria, comparación frecuencias modales invertidas y no invertidas.....	179

## Capítulo 1 : INTRODUCCIÓN

En el cálculo y diseño estructural, una de las propiedades más representativas de una estructura son sus parámetros modales. Estas son las propiedades que dictan cómo se comporta la estructura ante excitaciones del tipo dinámicas, es decir, excitaciones o cargas externas que induzcan movimiento en la estructura. Ejemplos incluyen: sismos, viento, movimiento de personas, etc.

En la práctica profesional, es común considerar los parámetros modales como constantes a través del tiempo. Sin embargo, factores externos ambientales, tales como la temperatura, humedad del aire, humedad del suelo, viento (entre otros factores), hacen que las propiedades modales varíen en el tiempo. Este hecho ha sido identificado en variados artículos científicos (Boroschek, Tamayo, and Aguilar 2014; Deraemaeker and Worden 2018; De Roeck, Peeters, and Maeck 2010) y es relevante tenerlo en cuenta, ya que las variaciones en las propiedades modales que genera el medio ambiente pueden llegar a ordenes de magnitud similares a variaciones producto de daño en la estructura, lo que invita a confundir los efectos ambientales erróneamente como daño en esta (Deraemaeker and Worden 2018).

Dado esto, el presente tema de memoria es motivado en observar cómo es el efecto del medio ambiente en distintos tipos estructuras. En específico, analizar cómo es la variación de la frecuencia modal frente al efecto del medio ambiente mediante dos tipos de comparaciones:

- Una comparación del ciclo de corto plazo, donde se compara el ciclo diario del efecto ambiental contra la variación a corto plazo de la frecuencia modal.
- Una comparación del ciclo de largo plazo, donde se compara el ciclo estacional del efecto ambiental contra la variación a largo plazo de la frecuencia modal.

Estos dos tipos de comparaciones mencionadas son la idea fundamental de esta memoria, en donde se busca analizar las distintas variables comparando aisladamente tanto su comportamiento a largo plazo (ciclo estacional) como su comportamiento a corto plazo (ciclo diario), logrando así poder realizar un análisis entre comportamientos diferentes de manera separada, en vez de generar un análisis con ambos efectos simultáneos y combinados. Dado que ambos comportamientos ocurren simultáneamente, en el desarrollo de esta memoria se explica cómo es el procedimiento para poder aislar cada comportamiento desde la data original.

Para poder realizar este estudio, se analizará un grupo de estructuras instrumentadas que cuentan con un registro continuo de las propiedades modales de la estructura, así como también contar con un registro de datos ambientales en la zona de

la estructura. Estas estructuras corresponden a: (i) Un edificio de hormigón armado de 9 pisos, principalmente destinado a oficinas; (ii) Dos iglesias de albañilería de adobe, construidas en el siglo XVI-XVII; (iii) 3 muros de albañilería de adobe, construidos y monitoreados en laboratorio. Los casos (i) y (ii) corresponden a estructuras complejas de mediano-gran tamaño principalmente estructuradas en base a muros, mientras que el caso (iii) corresponde a 3 estructuras de muro simple, donde cada una es idéntica en geometría entre sí, excepto en el espesor de muro, el cual es distinto entre los 3 casos. Los materiales de construcción de cada estructura se delimitan en estructuras de hormigón armado (caso i) y estructuras de albañilería de adobe (casos ii y iii).

Respecto a los parámetros ambientales de interés para este estudio, se encuentra la temperatura ambiental, humedad relativa del aire, humedad absoluta del aire y presencia de precipitación. Se considera efecto de la temperatura ambiental dado que se ha demostrado en diversas investigaciones (Albornoz 2013; Kita, Cavalagli, and Ubertini 2019; De Roeck, Peeters, and Maeck 2010) que es una de las principales fuentes medioambientales de variación de los parámetros modales, principalmente de las frecuencias modales. Por otro lado, se incluyen los efectos de humedad (relativa y absoluta) dado que en las investigaciones de los autores (Aguilar et al. 2019; Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenco 2019b; Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenço 2019) se ha demostrado su influencia en las propiedades modales en estructuras de albañilería de adobe, las cuales corresponden a estructuras particularmente sensibles a cambios de humedad. Por último, se considera el parámetro de presencia de lluvia, dado que se ha observado que genera variación en los parámetros modales tanto en estructuras de hormigón armado (Boroschek, Tamayo, and Aguilar 2014) como en estructuras de albañilería (Kita, Cavalagli, and Ubertini 2019).

Para los alcances de esta memoria, esta variación de los parámetros modales se analizará principalmente en términos de desfase: cuanto tiempo toma para que la estructura afectada por el factor externo reaccione y se puedan apreciar cambios significativos en la propiedad modal, así como también observar la forma en que este desfase cambia a través del tiempo. Se verá también como el comportamiento del desfase varía según el tipo de estructura y el tipo de material de esta. Adicionalmente, al realizar las comparaciones del ciclo estacional (de largo plazo), se analizará la variación de la frecuencia modal tanto por desfase como por magnitud de la variación.

Finalmente, con los diferentes resultados, se espera obtener conclusiones generales acerca de cómo es el comportamiento de la frecuencia modal ante los efectos ambientales tanto a corto como a largo plazo, y analizar como varía este comportamiento según el tipo de edificio o tipo de material de este.

## 1.1 Objetivos

Objetivos Generales:

- Mediante la data de las estructuras instrumentadas, observar como el efecto del medioambiente genera cambios en la frecuencia modal.
- Tanto para las señales medio ambientales como para las señales de frecuencia modal, diferenciar comportamientos de cada señal entre comportamiento diario y comportamiento estacional. Correlacionar cambios entre variaciones estacionales y diarias para ambas señales.
- Determinar el desfase que presenta la respuesta de frecuencia modal ante los efectos del medio ambiente. Este análisis se realizará tanto para el comportamiento diario como para el comportamiento estacional.

Objetivos Específicos:

- Obtener data de las diferentes estructuras y generar una matriz de trabajo, la cual contenga las variables ambientales y variables modales a través del tiempo.
- Aplicar métodos de filtrado de datos para procesar cada registro de parámetros ambientales y modales, logrando separar cada registro en dos tipos de componentes: una componente que presenta el comportamiento puramente diario del registro y una componente que presente el comportamiento estacional.
- Observar cómo afecta el material y la estructuración presente en cada estructura a la forma de variación del parámetro modal.

## 1.2 Metodología

Para la memoria, se utiliza como referencia la siguiente metodología y plan de trabajo:

**Paso 1:** Revisión bibliográfica de artículos sobre el tema a tratar, los cuales están incluidos en la bibliografía del presente temario. En particular, se revisarán los artículos de los autores (Deraemaeker and Worden 2018; De Roeck, Peeters, and Maeck 2010), en donde se detalla en profundidad el tema de la variación de propiedades modales ante efectos del medioambiente.

**Paso 2:** Recolección de registros ambientales y registros modales de cada estructura a analizar. Para efectos de esta memoria, las estructuras a estudiar son:

- a) Torre central, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (Albornoz 2013; Boroschek, Tamayo, and Aguilar 2014; González, Boroschek, and Bilbao 2019).
- b) Iglesia de Andahuaylillas, Perú (Aguilar et al. 2019; Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenco 2019b, 2019a).
- c) Iglesia del Huaro, Perú (Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenco 2019b).
- d) Muros de albañilería de adobe en laboratorio, Pontificia Universidad Católica del Perú (Aguilar et al. 2019; Milton 2017).

Para efectos de esta memoria, solo se analizará el comportamiento y variación de la frecuencia modal de las estructuras. Respecto a los datos ambientales, solo se considerará:

- Temperatura ambiental [°C]
- Humedad absoluta ambiental (aire) [g/m<sup>3</sup>]
- Precipitación [mm]

**Paso 3:** Procesar data obtenida. Aplicar métodos de filtrado de datos para descomponer cada registro de parámetros ambientales y parámetros modales en componente diaria y estacional. Generar matrices de trabajo para cada una de las estructuras a analizar, donde se detalla:

- Fecha: Año, día, hora.
- Frecuencias modales de la estructura a través del tiempo.
- Factores ambientales a través del tiempo (Temperatura, Humedad)

**Paso 4:** Análisis Resultados. Estos incluyen:

- Generar histogramas, series de tiempo.
- Identificar correlación entre las variables de estudio.
- Diferenciar temperatura estacional y temperatura diaria, y correlacionar en forma independiente con la variación de propiedades.
- Establecer las características de la variación de la propiedad modal debido al ambiente.

**Paso 5:** Conclusiones.

Entender como es el mecanismo de corto plazo (ciclo diario) y el mecanismo de largo plazo (ciclo estacional) de la variación de la frecuencia modal ante factores externos de ambiente. Para cada mecanismo, identificar la forma de distribución y cuantificar cuanto tiempo se necesita para observar un cambio apreciable en las propiedades modales, y cómo este se mantiene en el tiempo. Obtener una conclusión o medida de que tan repetitivos son los efectos de largo plazo (ciclos estacionales) y los efectos de corto plazo (ciclos diarios).

## Capítulo 2 : MARCO TEÓRICO

### 2.1 Mediciones Ambientales y Características

Para cada estructura a analizar, se cuenta con registros de datos tanto de Temperatura Ambiental y de Humedad Relativa. Con temperatura ambiental se hace referencia a la temperatura [°C] a la que se encuentra el aire, mientras que con humedad relativa [%] se hace referencia al porcentaje de vapor de agua contenido en el aire (respecto a una temperatura fija). Estos registros fueron tomados por instrumentación instalada en la misma zona de la estructura, o por una estación meteorológica cercana a la estructura, de manera que los datos fueran fiel representación del medio ambiente al que está expuesta la estructura. Además de los registros de temperatura ambiental y de humedad relativa, es necesario un registro de humedad absoluta del aire. Este no se mide directamente mediante instrumentación, sino que se calculará mediante la siguiente expresión (Aguilar et al. 2019), la cual está en función de la temperatura ambiental y la humedad relativa. Se entenderá por humedad absoluta [g/m<sup>3</sup>] a la masa de vapor de agua por unidad de volumen de aire.

$$HA = \frac{6,112 \cdot \exp\left(\frac{17,67 \cdot T}{T + 243,5}\right) \cdot HR \cdot 2,1674}{(273,15 + T)} \quad (I)$$

donde HA: humedad absoluta del aire [g/m<sup>3</sup>]  
T: temperatura ambiental [°C]  
HR: temperatura ambiental [%]

Adicionalmente, se cuenta con registros de precipitación para cada zona, los cuales registran la cantidad de lluvia caída (en milímetros) por unidad de tiempo. De esta data se generan registros de los diferentes eventos de lluvia ocurridos, en los cuales se indica cuando inicio y termino la lluvia. Para determinar cuándo inicia un evento de lluvia, se verifica que la precipitación en ese momento sea mayor o igual a 0.1 [mm], mientras que para determinar el fin del evento se analiza que haya pasado al menos un día completo sin registros de precipitación, desde el inicio del evento.

Una propiedad importante de los datos ambientales (temperatura ambiental, humedad relativa y absoluta) es que presentan dos ciclos simultáneos pero distinguibles:

- a) Un ciclo estacional (o anual), con un periodo de un 1 año.
- b) Un ciclo diario, con un periodo de 24 horas.

El ciclo diario es el responsable de la variación de temperatura y humedad a corto plazo, la cual se aprecia con las variaciones diarias de estos parámetros y cómo varían respecto al día y la noche. Por otro lado, el ciclo estacional corresponde a la variación a



largo plazo de los parámetros ambientales, la cual se observa en como varían los parámetros ambientales a lo largo del año y entre estaciones de este. Adicionalmente, ambos ciclos presentan periodicidad, es decir, se encuentra la misma tendencia de comportamiento al comparar ciclos estacionales de distintos años o al comparar ciclos diarios de distintos días. Por otro lado, dado que ambos ciclos ocurren simultáneamente, no es directo observar la forma del ciclo diario, dado un parámetro ambiental fijo. Una forma de visualizarlo es calcular el ciclo diario promedio a lo largo de un año completo. Esto se logra al considerar todos los valores del parámetro ambiental que ocurren a las 00:00 (a lo largo del año) y promediarlos, y repitiendo el proceso para cada hora del día (desde las 00:00 hasta las 23:00). Ahora, generando un gráfico con cada valor promedio calculado con su hora del día respectiva, se obtendrá una curva que corresponderá a la variación promedio del ciclo diario. El hecho de poder calcular el ciclo diario promedio (para un parámetro ambiental específico) será de relevancia al momento de filtrado de datos. Se entrará en más detalles sobre este tema en el Capítulo 4 de esta memoria.

## **2.2 Mediciones de Frecuencia Modal y Características**

Dada una estructura, es posible medir a través del tiempo sus propiedades modales (frecuencia modal, amortiguamiento modal y formas modales) instalando en puntos estratégicos de ella acelerómetros que midan continuamente en el tiempo los movimientos de la estructura, los cuales son generados únicamente por condiciones medioambientales y de operación/servicio de la estructura (González, Boroschek, and Bilbao 2019). Esta técnica de identificación modal es llamada análisis modal operacional.

En la mayoría de los casos, la cantidad de modos de vibrar que es posible capturar con este método es limitada, donde únicamente es posible obtener los modos que los acelerómetros logren capturar. Este hecho es principalmente debido a:

- 1) La localización y sensibilidad del acelerómetro, si es que efectivamente ocurre movimiento del modo en la ubicación del acelerómetro, y si es así, si es que el acelerómetro es capaz de registrar la magnitud del movimiento generado por el modo de vibrar.
- 2) Al tipo de excitación externa que afecte a la estructura, y si estos movimientos son capaces de excitar los distintos modos de vibrar a medir.

Dado que en la práctica se cuenta con un número limitado de acelerómetros, es imposible cubrir e identificar todos los modos de vibrar para la mayoría de las estructuras. Dado este hecho, se generan planes de instrumentación, donde se analizan lugares estratégicos de la estructura en donde instalar los acelerómetros, de manera que se logre identificar la mayor cantidad de modos de vibración (o lograr identificar los modos específicos de interés) y con la mayor definición de movimiento posible.

Ya obtenida la data de aceleración, existen diversos métodos para procesar esta data y obtener las propiedades modales de la estructura (González, Boroschek, and Bilbao 2019; Zonno et al. 2018), algunos métodos incluso necesitando más parámetros de entrada que la aceleración. Cada método presenta distintas características y niveles de confianza para cada parámetro modal. Sin embargo, para los alcances de esta memoria, no se entrará en detalles acerca de estos métodos. No obstante, algo que si es relevante a mencionar es el hecho que los métodos de identificación modal no son perfectos, y debido a diversas condiciones (ruido temporal en la data, insuficiente ruido de excitación ambiental, corte de electricidad de los sistemas), puede ocurrir que no sea posible generar un valor de propiedad modal para un intervalo de tiempo específico. En el caso que esto ocurra, es común dejar una falta de dato en este instante de tiempo específico, lo que genera un vacío en los registros generados de data modal. Ahora, estos vacíos en la data pueden generar conflictos importantes al momento de procesar tal registro, sin embargo, este hecho tiene solución. El procedimiento que se decidió ocupar en esta memoria para poder realizar un procesamiento adecuado en este tipo de casos se describe en la sección 4.1.

## **2.3 Revisión Trabajos Anteriores**

La variación de las propiedades modales debido a efectos del medioambiente ha sido un tema tratado en diversos estudios científicos, cada uno con distintos enfoques. Una revisión de algunos de estos trabajos se realiza a continuación.

Un primer paso para este problema es ver qué tipos de variables ambientales son las que generan las principales variaciones en los parámetros modales. El estudio por (De Roeck, Peeters, and Maeck 2010) indica a la temperatura ambiental como una de las principales fuentes de variación de las frecuencias modales para el caso de un puente de hormigón ubicado en Suiza. En una línea similar, el estudio de (Boroschek, Tamayo, and Aguilar 2014) revisa el caso de Torre Central (edificio de hormigón armado), en donde se identifican variaciones en las frecuencias modales a causa de la temperatura ambiental, presencia de lluvia y porcentaje de humedad del suelo. En particular, en este estudio se observa que las variaciones en las frecuencias modales disminuyen al filtrar y considerar únicamente datos en fechas sin presencia de lluvia ni eventos sísmicos, y únicamente cuando la temperatura externa se encuentra en el rango entre 20.5°C – 21.5°C.

En el trabajo de (Aguilar et al. 2019) se analiza el caso de muros de albañilería de adobe construidos en laboratorio, así como se analiza el caso de la iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, estructura de albañilería de adobe y patrimonio nacional del Perú. Para estas estructuras, se identifican variaciones de las frecuencias modales producto de la temperatura ambiental y la humedad relativa del aire. Una de las conclusiones de la investigación es la factibilidad de utilizar la humedad absoluta como único parámetro para modelar las variaciones de las frecuencias modales para estructuras de albañilería de adobe. Esto se explicó en base que la humedad absoluta permite combinar la información tanto de temperatura como de humedad en un único

parámetro. En (Kita, Cavalagli, and Ubertini 2019), se menciona que las variaciones de los parámetros modales de estructuras de albañilería son particularmente sensibles no únicamente al efecto de la temperatura, sino también a la humedad relativa del aire. Este hecho se explica debido a que la humedad relativa del ambiente afecta el contenido de humedad dentro del material mismo, dada a la porosidad que presenta, afectando las propiedades del material.

En el estudio de (Kita, Cavalagli, and Ubertini 2019) se determina que el mecanismo de variación de las frecuencias modales ante el medio ambiente puede ser distinto según el tipo de estructura analizada y el material de construcción predominante de esta. En el mismo estudio, el caso de un palacio de albañilería de piedra (Palazzo dei Consoli, Italia) fue estudiado, donde se observó una correlación negativa entre la temperatura ambiental y frecuencias modales de la estructura: el aumento de una tiende a la disminución de la otra. Este hecho fue explicado debido a que disminuciones de temperatura generaban un acortamiento de los refuerzos estructurales de acero presentes en la estructura, lo que resultaba en un incremento de rigidez global de la estructura. Sin embargo, en el mismo estudio, se identificó que este comportamiento de las frecuencias modales era contrario a lo que se había observado anteriormente en otros casos de estudio de estructuras de albañilería, donde en estas se registraban correlaciones positivas entre temperatura y frecuencia modal. Estos estudios proponen que, para estructuras de albañilería, un aumento de temperatura provoca una expansión térmica del material, lo que podría generar que grietas superficiales o internas en el material se cierren, provocando un aumento temporal de la rigidez global en la estructura, lo que generaría como resultado que la frecuencia modal aumente ante la presencia de aumentos de temperatura.

En la memoria realizada por (Albornoz 2013), se identifica que para Torre Central, estructura de hormigón armado, las frecuencias modales del edificio tienden a disminuir ante aumentos de temperatura ambiental. El trabajo de (Kita, Cavalagli, and Ubertini 2019) indica que para estudios de estructuras de hormigón armado, usualmente se observa una correlación negativa entre frecuencia modal y temperatura. Este comportamiento se explica debido al efecto que tiene la temperatura en el Módulo de Young, el cual ante aumentos de temperatura disminuye su valor, lo que disminuye la rigidez del material de la estructura (hormigón) y por ende genera una disminución de las frecuencias modales de la estructura.

Se ha identificado que existe una variación estacional y diaria en la data de frecuencias modales. En el estudio de (Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenco 2019a), se identifica una clara influencia estacional en las variaciones de las frecuencias modales de la iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, así como también se identifican variaciones diarias en los registros modales. Más aún, la investigación determina que estas variaciones diarias en las frecuencias modales presentan un desfase con respecto a las variaciones diarias ambientales. Estos resultados y conclusiones se mantienen consistentes el caso de estudio de muros de albañilería de adobe de laboratorio (Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenço 2019).

Siguiendo la idea anterior, se tiene que tanto los registros de frecuencia modal como los registros ambientales presentan ciclos de variación estacionales y diarios. Este hecho constituye la idea fundamental de esta memoria, donde se busca analizar las distintas variables comparando aisladamente tanto su ciclo estacional como su ciclo diario. Naturalmente, dado que ambos ciclos suceden simultáneamente, se necesita recurrir a herramientas matemáticas que permitan aislar ambos efectos y permitir realizar comparaciones aisladas. Los conceptos principales de estas herramientas matemáticas se explican en las secciones 2.4 y 2.5.

## **2.4 Transformada de Fourier**

La transformada de Fourier es una herramienta matemática que permite identificar las diferentes frecuencias constituyentes que son parte de una señal. Se entenderá como frecuencia constituyente como una señal con frecuencia de vibrar de banda angosta.

En términos formales, la transformada de Fourier es una transformación matemática que toma una función continua en el espacio del tiempo y la transforma al espacio de la frecuencia, donde se identifican las frecuencias constituyentes de la función analizada mediante máximos locales. Cada máximo local estará ubicado en una frecuencia de vibrar específica: esta posición marca la frecuencia de vibrar de cada señal constituyente identificada.

A modo de ejemplo, en la Figura 2.1 se muestra una señal a través del tiempo, compuesta por una función seno de frecuencia 4 [Hz] sumada a una función seno de frecuencia 8 [Hz], ambas de amplitud unitaria. Al aplicar la Transformada de Fourier a esta señal, se obtiene la Figura 2.2, donde se tiene la señal en el dominio de la frecuencia, donde el eje de las abscisas muestra un rango de frecuencias [Hz] específico. En esta figura se identifican máximos locales en 4 Hz y 8 Hz: estos máximos corresponden a las frecuencias constituyentes de la señal, y que se lograron identificar utilizando la Transformada de Fourier de la señal.

En este trabajo, se utilizará la transformada de Fourier de una señal para identificar las frecuencias constituyentes de una señal, marcadas por los máximos locales ubicados en frecuencias de vibrar de banda angosta.

Es necesario aclarar que la transformada de Fourier de una señal corresponde a una función compleja, la cual cuenta tanto con una componente real como una imaginaria. Para poder analizar la transformada de Fourier en un gráfico magnitud vs frecuencia (tal como se muestra en la Figura 2.2), basta con obtener el valor absoluto de la función (para cada punto de esta) y graficar contra el rango de frecuencias correspondiente. Este será el método principal para identificar las frecuencias que componen a una señal.

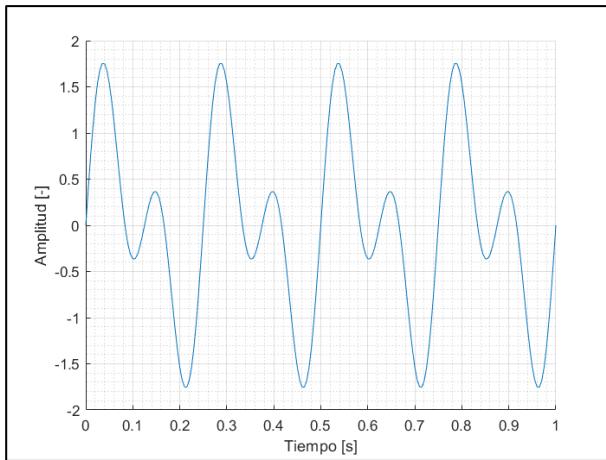


Figura 2.1: Ejemplo, señal a través del tiempo.

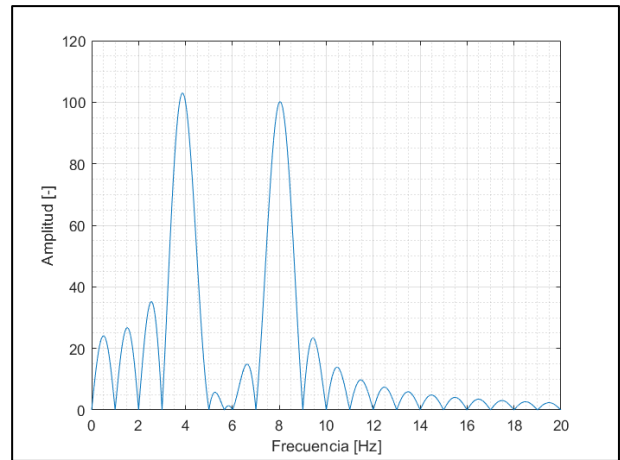


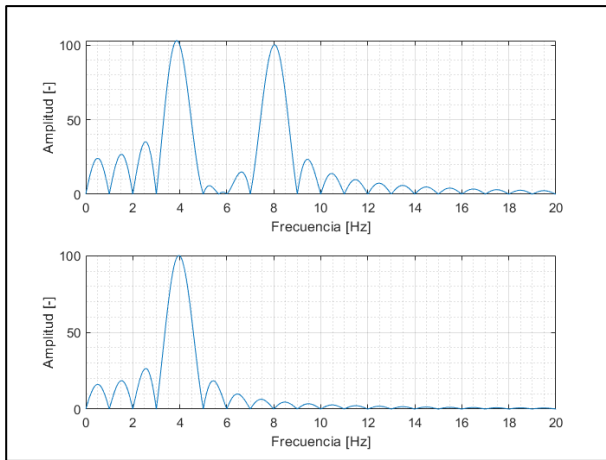
Figura 2.2: Ejemplo, señal en el espacio de la frecuencia.

Por otro lado, dado que en el contexto de esta memoria se trabajará con señales de datos discretas, se debe usar la transformada de Fourier discreta. Funciona de la misma manera que la transformada de Fourier descrita anteriormente, solo que requiere como parámetro de entrada una señal discreta con una frecuencia de muestreo constante a lo largo de la señal.

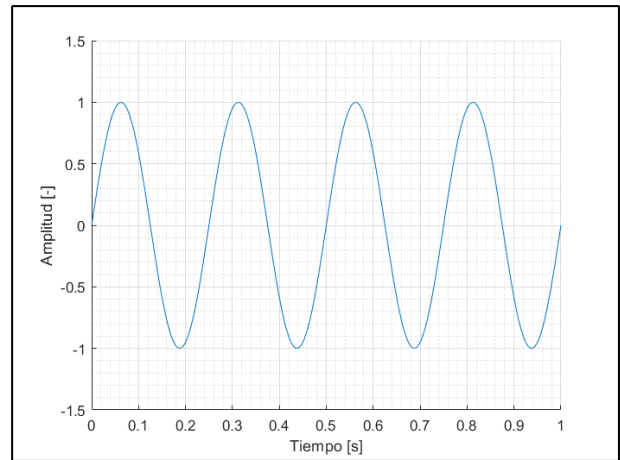
## 2.5 Filtrado de Componentes

Además de existir la transformada de Fourier, que toma una señal en el dominio del tiempo y la transforma a una señal en el dominio de la frecuencia, existe también una transformada inversa, que lleva la señal en el dominio de la frecuencia de vuelta al dominio del tiempo, efectivamente reconstruyendo la señal en base a las frecuencias constituyentes que se especifican en el espacio de la frecuencia (Brigham and Morrow 1967).

Esta transformada inversa da la posibilidad para poder filtrar una señal en el espacio de la frecuencia y separarla en sus componentes básicas. En la Figura 2.3 (parte superior) se observa la Transformada de Fourier de la señal mostrada en la Figura 2.1 (señal compuesta por frecuencias de 4 Hz y 8 Hz). Si se modifica la transformada, filtrando fuera el máximo local en 8 Hz, la transformada de Fourier queda como se muestra en la Figura 2.3 (parte inferior), donde únicamente se identifica una frecuencia constituyente en 4 Hz. Ahora, si a esta transformada modificada se le aplica la Transformada de Fourier Inversa, se obtiene la Figura 2.4, donde se muestra una señal resultante compuesta por una única frecuencia de 4 Hz.



**Figura 2.3: Ejemplo. Superior: transformada de Fourier de señal de 4 y 8 [Hz]. Inferior: transformada de Fourier filtrada.**



**Figura 2.4: Ejemplo, señal filtrada de 4 [Hz].**

Este hecho se debe a que la Transformada de Fourier Inversa reconstruye una señal a partir de las frecuencias constituyentes presentes en la transformada de Fourier (ver Figura 2.3). Si esta transformada se modifica, filtrando las frecuencias constituyentes presentes y conservando únicamente un rango de frecuencias que se quieran separar de la señal original, al aplicarle la transformada inversa se obtendrán estas frecuencias constituyentes de interés en el espacio del tiempo, efectivamente separando estas componentes de la señal original.

Esta acción de filtrar es posible realizarla de diversas maneras, dado que existen distintos tipos de filtros y cada uno con distintos tipos de resultados. Para efectos de esta memoria, se utilizó un filtro de tipo Butterworth, aplicándose mediante un filtrado doble en el espacio del tiempo, aplicado en dos direcciones, el cual consiste en:

- a) Realizar un primer filtrado a la señal a filtrar.
- b) Invertir el orden de esta señal resultante, donde el primer dato se convierte en el último, y el último dato se convierte en el primero.
- c) Aplicar el filtro nuevamente sobre la señal invertida.
- d) Finalmente, invertir nuevamente la señal resultante, restaurándose el orden original de la señal.

Este procedimiento asegura que la señal filtrada tenga una distorsión nula de fase. Este procedimiento de filtrado también se conoce en inglés como forward-backward filtering.

Ahora, como se mencionó anteriormente, si se quiere filtrar una componente específica, se debe asignar un rango de frecuencias en que se aplicará el filtro, de modo de rescatar de la data únicamente las señales presentes en este intervalo de frecuencia. Para asignar este rango, se debe tener presente el incluir dentro de este la frecuencia de vibrar propia de la componente a filtrar, así como también incluir una vecindad de frecuencias respecto a la frecuencia específica de la componente. La extensión de este

margen de frecuencias adicionales depende del usuario que realice el filtrado y el tipo de resultados que se busquen del filtrado: un rango de frecuencia mayor obtendrá mayor cantidad de información de la data original (cercana a la frecuencia a de la componente), mientras que un rango menor permitirá observar con mayor claridad el comportamiento de la frecuencia de vibrar específica de la componente. Se debe asegurar también que el rango de frecuencias no intercepte rangos de frecuencias a filtrar de componentes adyacentes, de modo que no exista información redundante entre componentes filtradas.

Por último, para asegurar que una componente filtrada (en el espacio del tiempo) se haya generado correctamente, se debe aplicar la transformada de Fourier a esta señal filtrada y comparar el máximo local que se genera en la frecuencia específica de la componente, versus el mismo máximo local que se presentaba en la transformada de Fourier de la señal original. Si la magnitud de ambos máximos locales coincide (con un error aceptable de un 0.5%), se considerará el filtrado como correcto. En el caso que esto no se cumpla, se debe modificar el rango de frecuencia a filtrar e iterar hasta que las magnitudes de ambos máximos locales coincidan.

En el contexto de este trabajo de memoria, la acción de especificar un rango de frecuencias de interés, filtrar la señal respecto a este rango de frecuencias y obtener en el espacio del tiempo la componente respectiva se le denominará filtrado de componentes. Por lo tanto, si se desea obtener en el espacio del tiempo las distintas frecuencias constituyentes de una señal, basta con filtrar individualmente cada componente de frecuencia constituyente de la señal.

En el desarrollo de esta memoria, todo el procesamiento de datos fue realizado en el software computacional MATLAB. En particular, para realizar el procedimiento de filtrado en dos direcciones, se utilizó la función integrada de MATLAB llamada "FiltFilt".

## Capítulo 3 : DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS A ANALIZAR

### 3.1 Torre Central

#### 3.1.1. Descripción General

Para este subcapítulo, toda la información referente al edificio de Torre Central proviene de la referencia (González, Boroschek, and Bilbao 2019).

El edificio de Torre Central (Figura 3.1 y Figura 3.2) está ubicado dentro de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) de la Universidad de Chile, la cual está ubicada en la comuna de Santiago, Región metropolitana. Corresponde a un edificio de hormigón armado, el cual fue construido en el año 1962 y consta de 9 pisos y 2 niveles de subterráneo. Presenta una altura de 30,2 metros y un área superficial de 30 x 19 metros cuadrados. Su estructuración corresponde a un edificio de corte, principalmente compuesto por muros de hormigón armado, de espesor promedio de 35 centímetros. El uso de la estructura se limita principalmente para oficinas administrativas y salas de clases.



Figura 3.1: Torre Central, cara norte.



Figura 3.2: Torre Central, cara oeste.



### 3.1.2. Condiciones Ambientales

Las condiciones climáticas a la que se ve expuesta Torre Central corresponden a un clima semiárido, donde se observan estaciones marcadas por temperatura, con inviernos poco lluviosos y veranos secos.

Para la medición y registros de las variables ambientales de interés, se utilizan los datos registrados por la estación meteorológica del departamento de geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Esta estación se encuentra en el edificio de Ingeniería Civil-Geofísica, la cual está instalada en la terraza de este. Dado que este edificio se encuentra adyacente a Torre Central (distancia menor a 100 metros), se considera que la data ambiental registrada refleja correctamente las condiciones ambientales que se ve afectada Torre Central.

De esta estación meteorológica mencionada, se cuenta con los siguientes registros:

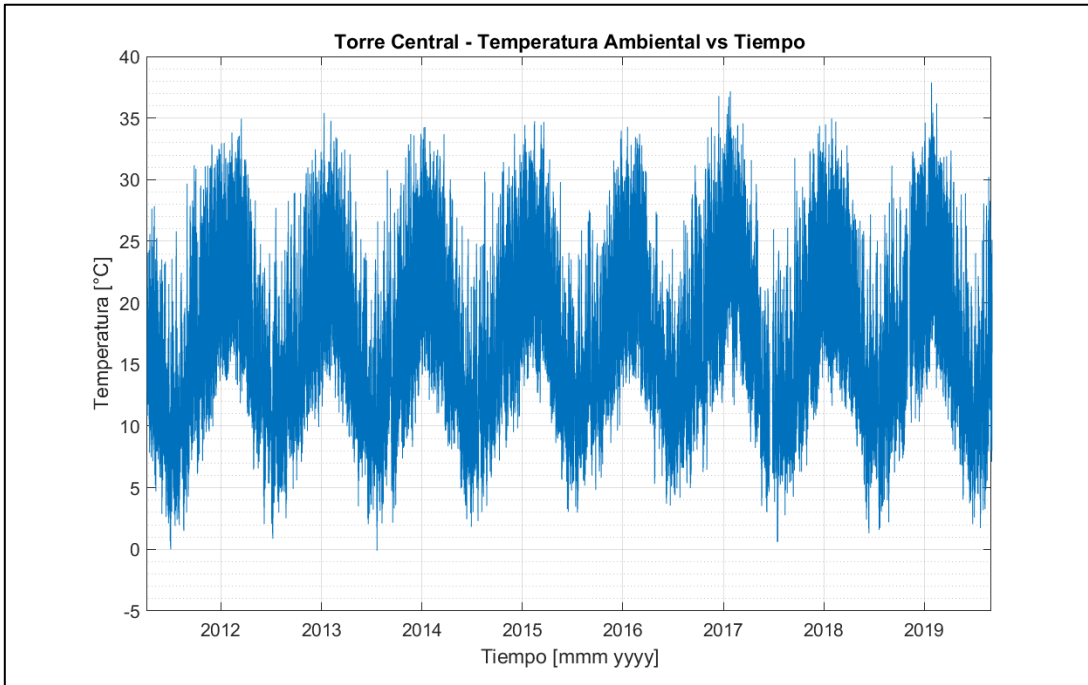
- Temperatura ambiental [°C]
- Humedad relativa del aire [%]
- Precipitación [mm]

Dado que se requiere también el registro de humedad absoluta, esta se calculará utilizando la Expresión (I) indicada en la sección 2.1. Para cada uno de estos registros ambientales se cuenta con data desde el 08 de abril del 2011 hasta el 03 de septiembre del 2019. La frecuencia de muestreo de los datos es tal que se reporta un nuevo dato cada 15 minutos. La información de cuantos valores vacíos presenta cada registro ambiental se muestra en la Tabla 3.1.

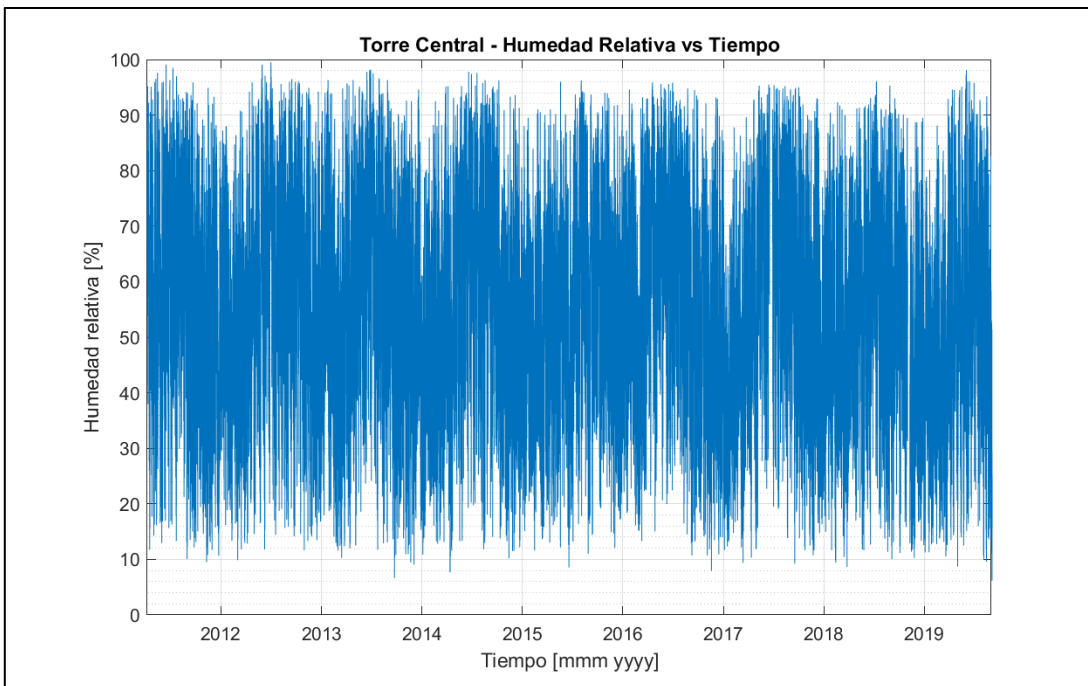
**Tabla 3.1: Torre Central, información de número de datos vacíos para cada registro ambiental.**

<b>Variable de Estudio</b>	<b>N° de datos del registro [-]</b>	<b>N° de datos vacíos [-]</b>	<b>Porcentaje de datos vacíos [%]</b>
Temperatura Ambiental [°C]	294816	2247	0.8
Humedad Relativa [%]	294816	2231	0.8
Humedad Absoluta [g/m <sup>3</sup> ]	294816	2256	0.8

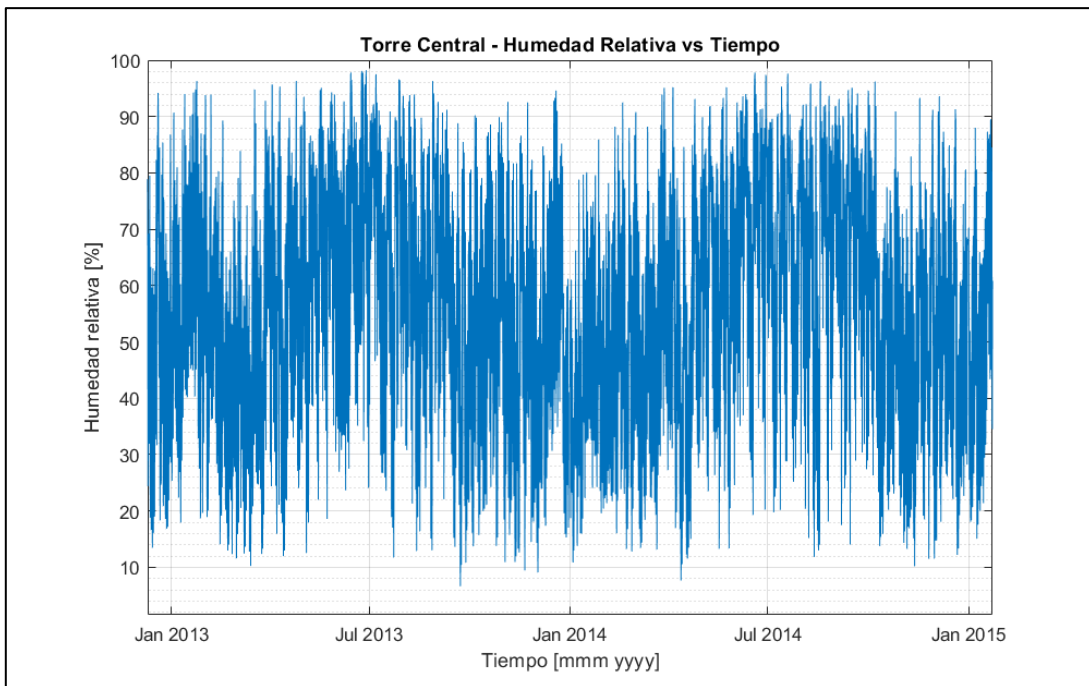
Desde la Figura 3.3 a la Figura 3.6 se muestran las series de tiempo de las variables ambientales de Temperatura Ambiental, Humedad Relativa y Humedad Absoluta, respectivamente. Notar que se distingue claramente el ciclo estacional de la data para todas las variables anteriores. En la sección A.3.1 de los Anexos se presentan los registros de eventos de lluvia (generados según indicado en la sección 2.1) para el edificio de Torre Central.



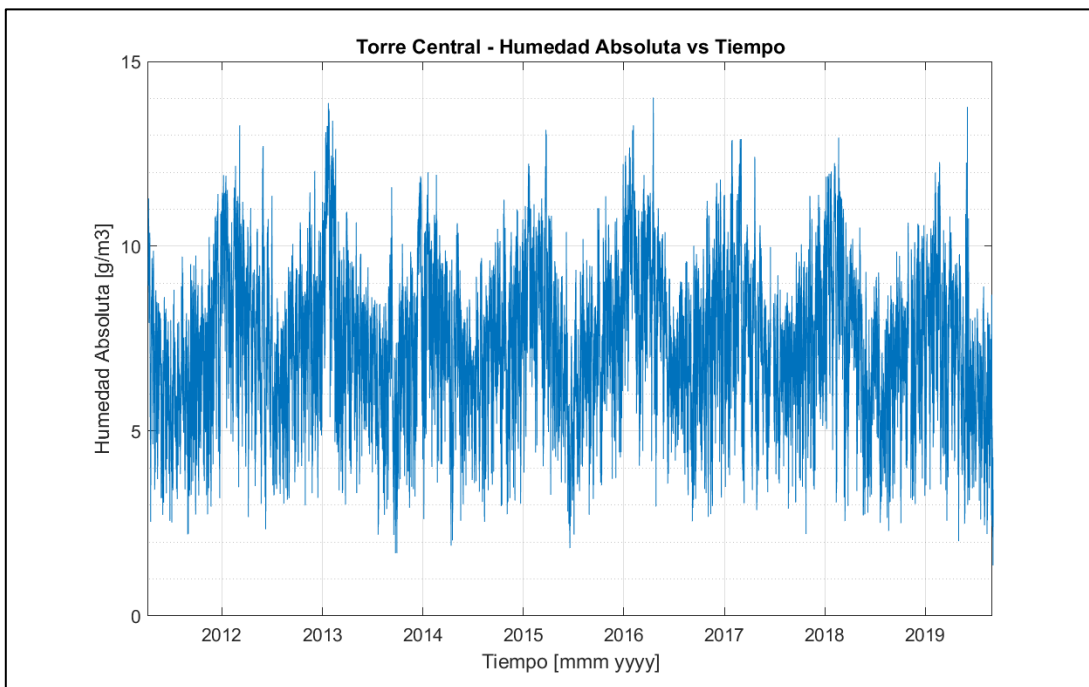
**Figura 3.3: Torre Central, registro de temperatura ambiental.**



**Figura 3.4: Torre Central, registro de humedad relativa.**



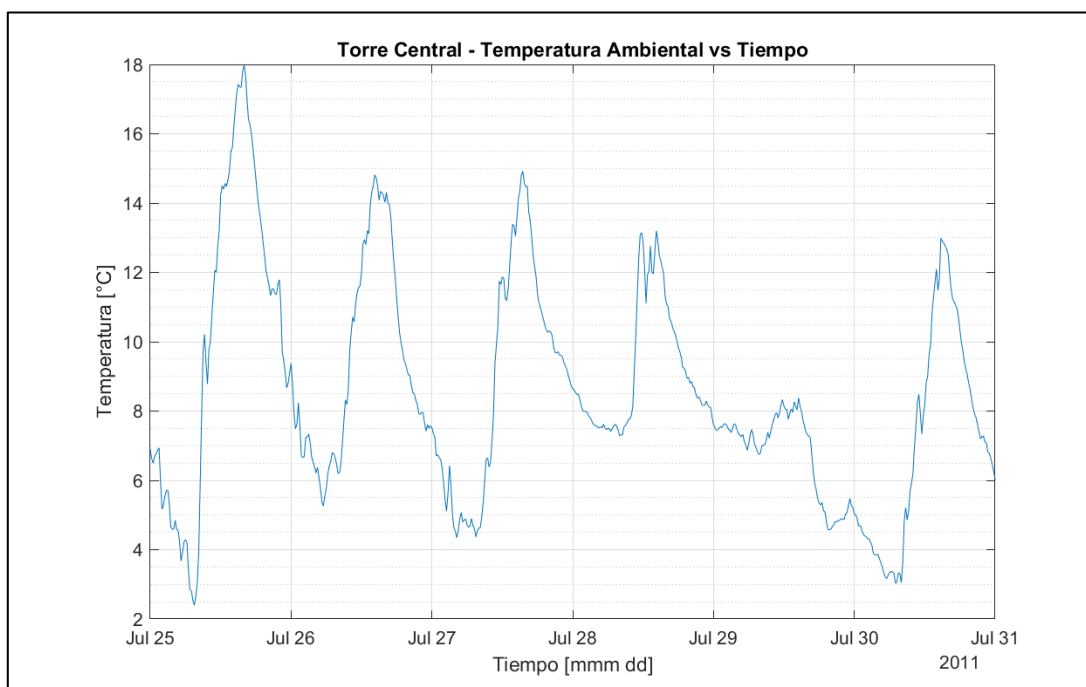
**Figura 3.5: Torre Central, registro de humedad relativa (acercamiento años 2013-2015).**



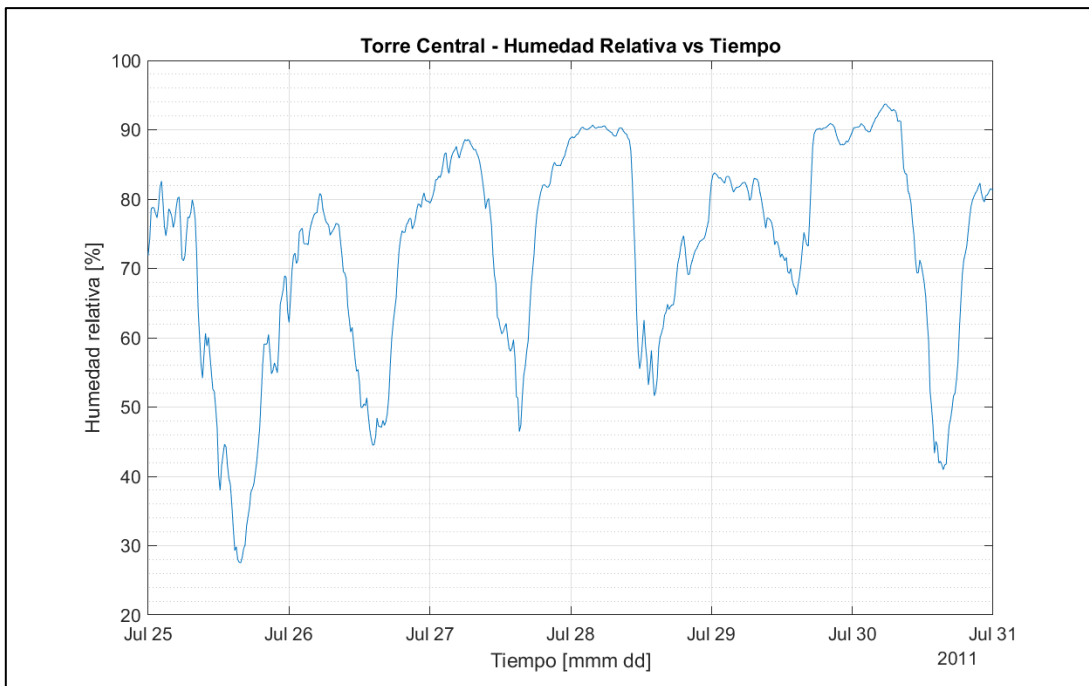
**Figura 3.6: Torre Central, registro de humedad absoluta.**

Tanto de las series de tiempo (Figura 3.3 a Figura 3.6) como de la Tabla 3.1, se observa que el porcentaje de datos vacíos en los registros ambientales es muy bajo, sin intervalos mayores de pérdidas de datos presentes en los registros.

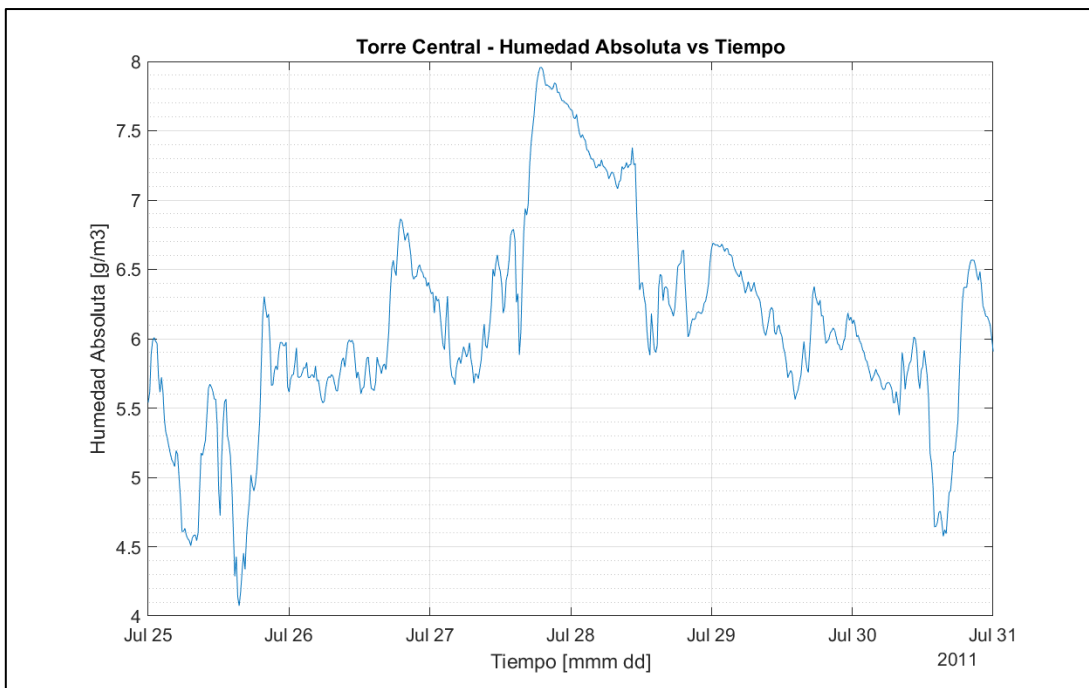
En la Figura 3.7 a la Figura 3.9 se muestra un acercamiento diario a las series de tiempo de temperatura ambiental, humedad relativa y humedad absoluta, respectivamente. Se observa claramente el ciclo de variación diario para la temperatura ambiental y la humedad relativa. Sin embargo, para la humedad absoluta, se logra identificar el ciclo diario, pero este no se observa consistentemente para cada intervalo de día del registro (ver Figura 3.9).



**Figura 3.7: Torre Central, variación diaria de la temperatura ambiental. Ventana de tiempo de la serie original, desde 25/jul/2011 hasta 31/jul/2011.**



**Figura 3.8: Torre Central, variación diaria de la humedad relativa. Ventana de tiempo de la serie original, desde 25/jul/2011 hasta 31/jul/2011.**



**Figura 3.9: Torre Central, variación diaria de la humedad absoluta. Ventana de tiempo de la serie original, desde 25/jul/2011 hasta 31/jul/2011.**

### 3.1.3. Registro Propiedades Modales

El edificio se encuentra instrumentado con una red de 8 acelerómetros uniaxiales ubicados estratégicamente en el edificio, permitiendo registrar la respuesta dinámica de este y poder generar un registro de las propiedades modales, y en particular, de la frecuencia modal del edificio. Los registros de frecuencia modal fueron obtenidos mediante el método Cov-SSI (Covariance-Driven Stochastic Subspace Identification) y limpiados mediante el algoritmo de OPTICS (Albornoz 2013; González, Boroschek, and Bilbao 2019).

En la Figura 3.10 se muestran el registro de las frecuencias modales del edificio. Para este trabajo se cuentan con datos desde el 08 de abril del 2011 hasta el 03 de septiembre del 2019. La frecuencia de muestreo de los datos es tal que se reporta un nuevo dato cada 15 minutos. En la Tabla 3.2 se muestra información de cuantos datos vacíos presenta cada frecuencia de vibrar.

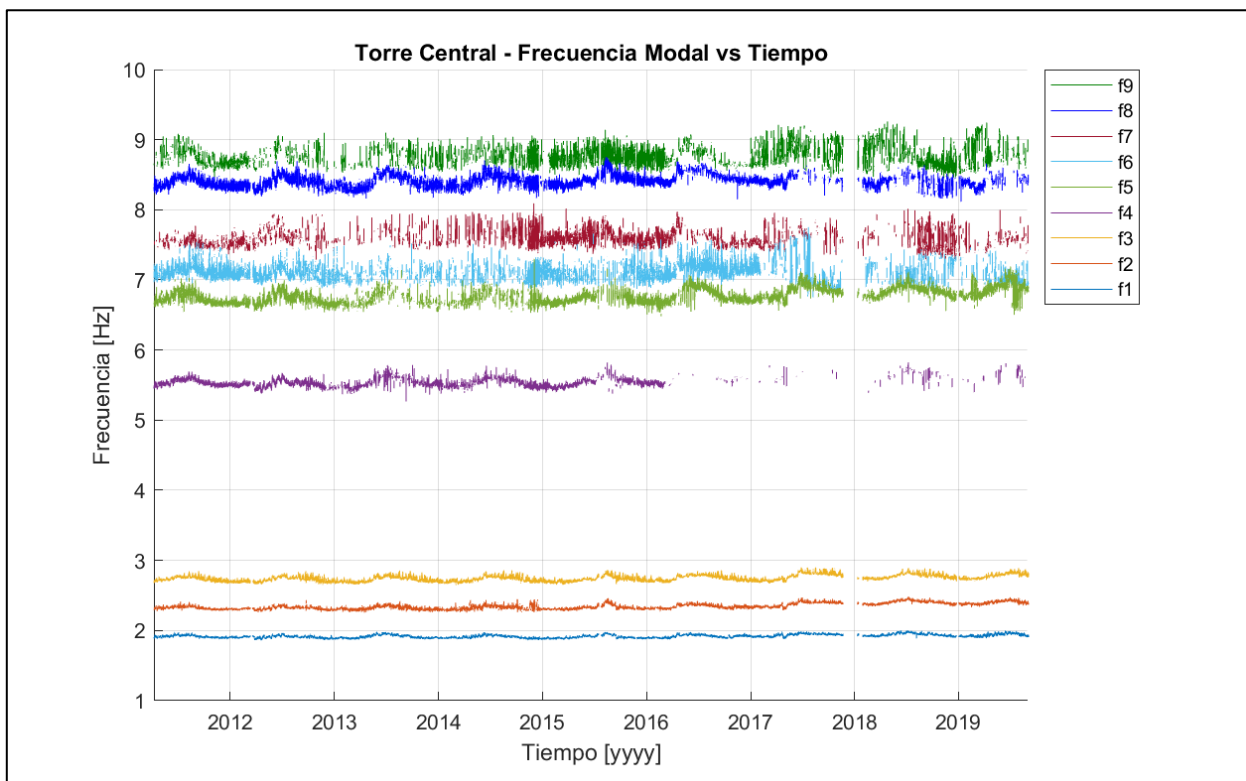


Figura 3.10: Torre Central, registro frecuencias modales.

**Tabla 3.2: Torre Central, información de número de datos vacíos para cada frec. modal.**

<b>Frecuencia Modal [-]</b>	<b>N° de datos del registro [-]</b>	<b>N° de datos vacíos [-]</b>	<b>Porcentaje de datos vacíos [%]</b>
1	294.816	60.534	20,5
2	294.816	108.907	36,9
3	294.816	71.667	24,3
4	294.816	212.381	72,0
5	294.816	183.075	62,1
6	294.816	227.100	77,0
7	294.816	262.564	89,1
8	294.816	191.239	64,9
9	294.816	261.656	88,8

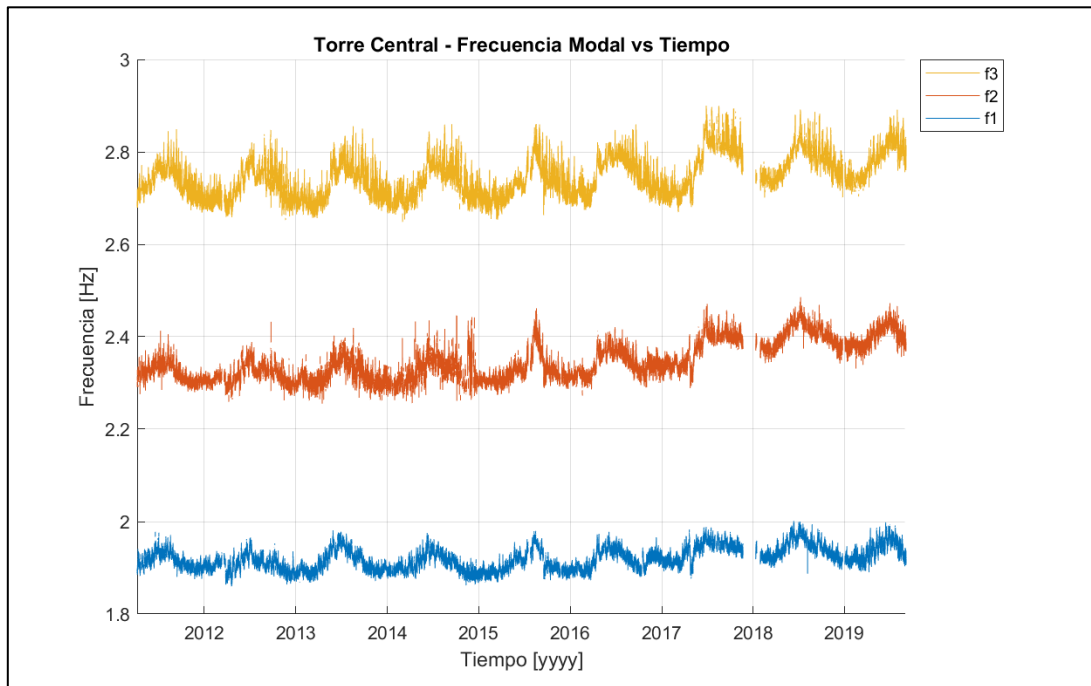
Para las 3 primeras frecuencias modales, se observan vacíos de datos en secciones puntuales de la data, mientras que para la cuarta frecuencia modal en adelante se observan porcentajes de datos vacíos importantes (sobre el 60%). Se tiene un vacío de data común para todas las frecuencias modales desde mediados de noviembre del 2017 hasta inicios de febrero del 2018.

Para efectos de esta memoria, se trabajarán y analizarán las 3 primeras frecuencias modales de Torre Central (Figura 3.11), dado que son las frecuencias que presentan los menores porcentajes de datos vacíos (respecto a las demás frecuencias modales).

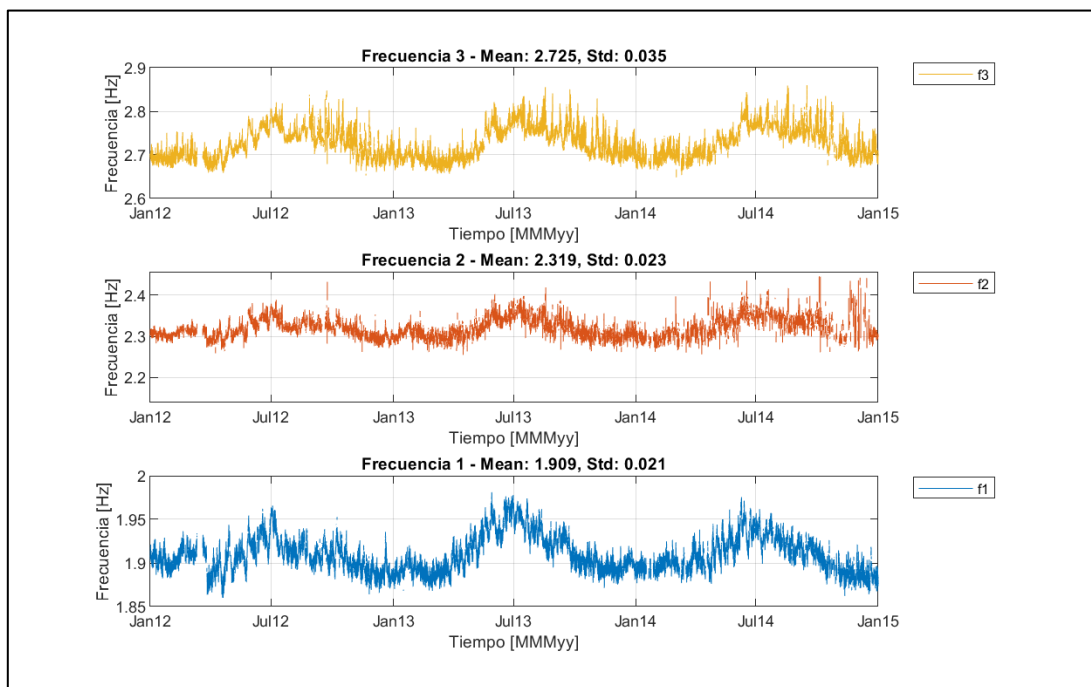
De la Figura 3.11 a la Figura 3.12 se puede identificar la variación estacional de la data, donde cada frecuencia modal presenta su mínimo valor de oscilación a inicio de año, mientras que a mitad del año se observa el valor máximo de oscilación. Este hecho se comparte entre frecuencias modales. Además, se observa que desde el año 2017 en adelante, las frecuencias modales presentan un aumento de magnitud respecto a la tendencia anterior (Figura 3.11). Este hecho se debe a que, desde aquella fecha, se ejecutó un plan de reparaciones al edificio, rigidizando el sistema estructural, lo que genera un aumento a los valores de frecuencia modal.

Por otro lado, de la Figura 3.13 a la Figura 3.14 se muestra un acercamiento diario a la data de las 3 primeras frecuencias modales, donde se observa la variación diaria que presenta la data. En particular, se tiene que el ciclo diario no es identificable en cada segmento de la señal (ver Figura 3.14, frecuencia modal 1), o que la forma de oscilación no es consistente para cada segmentos puntuales de la señal (ver Figura 3.13, frecuencia modal 2). Es posible que estos casos correspondan a días feriados o de fin de semana, periodos en donde la actividad en el edificio es menor, lo que provoca que la calidad de identificación modal sea menor. Por otro lado, se tiene que la magnitud de oscilación del ciclo diario no necesariamente es igual entre frecuencias modales. Tampoco es directo asegurar que la variación diaria presente exactamente la misma fase entre frecuencias

modales, es decir, que entre frecuencias modales coincide la ubicación temporal entre máximos y mínimos de la variación diaria.

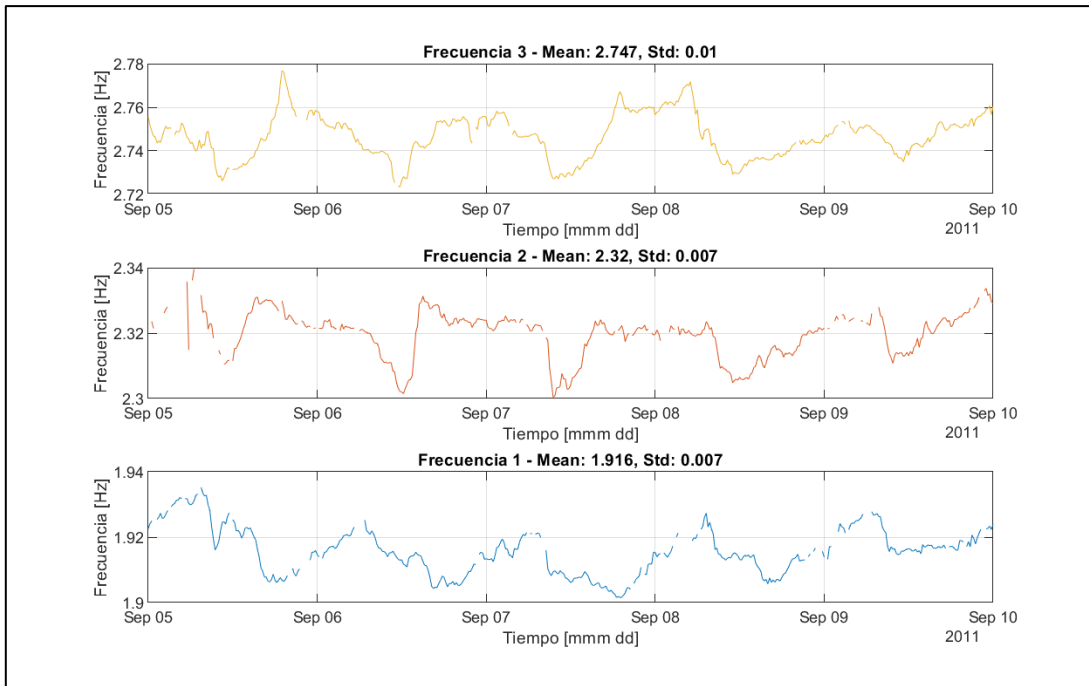


**Figura 3.11: Torre Central, frecuencias modales a analizar.**

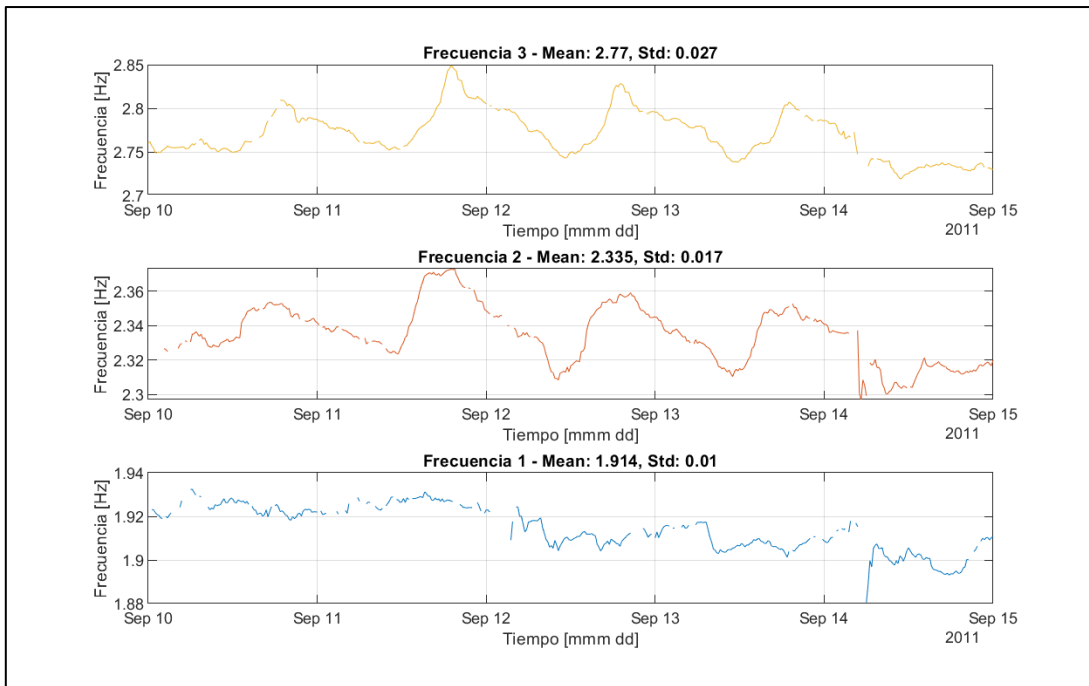


**Figura 3.12: Torre Central, zoom a variación estacional de las frec. modales.**





**Figura 3.13: Torre Central, variación diaria de las frec. modales. Ventana de tiempo de las series originales, desde 05/sep/2011 hasta 10/sep/2011.**



**Figura 3.14: Torre Central, variación diaria de las frec. modales. Ventana de tiempo de las series originales, desde 10/sep/2011 hasta 15/sep/2011.**

## 3.2 Iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas

### 3.2.1. Descripción General

Para este subcapítulo, toda la información referente a la iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas proviene de las referencias (Aguilar et al. 2019; Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenco 2019a, 2019b).

La iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas (Figura 3.15 a la Figura 3.17), también conocida como la Capilla Sixtina de América, está ubicada a 41 kilómetros de la ciudad de Cuzco, Perú, en la localidad de Andahuaylillas, pequeño pueblo de la provincia de Quispicanchi. Se estima que la iglesia fue construida a fines del siglo XVI. La iglesia es declarada como patrimonio nacional del Perú. Corresponde a una estructura de albañilería de adobe, principalmente compuesta por muros de adobe de espesor desde los 1.1 a 2.0 metros. La iglesia presenta dos sectores principales: la nave central y el presbiterio. Los muros presentan una altura promedio de 10 metros en la nave central y de 12 metros en la sección del presbiterio. La iglesia se extiende en un área superficial de 27 x 61 metros cuadrados.



Figura 3.15: Iglesia Andahuaylillas, cara frontal. ([www.freepik.es](http://www.freepik.es))



Figura 3.16: Iglesia Andahuaylillas, cara frontal. ([www.imaginaperuviajes.com](http://www.imaginaperuviajes.com))



Figura 3.17: Iglesia Andahuaylillas, interior. ([www.blog.redbus.pe](http://www.blog.redbus.pe))

### 3.2.2. Condiciones Ambientales

Las condiciones climáticas a la que se ve expuesta la Iglesia de Andahuaylillas corresponden a un clima templado, donde se presentan lluvias abundantes entre los meses de noviembre a abril, mientras que entre los meses mayo a octubre se presenta un clima más seco.

Para los registros de los datos ambientales, se cuenta con un sistema de instrumentación de temperatura y humedad relativa del aire (Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenco 2019a), instalado tanto dentro de la iglesia (para mediciones de ambiente al interior de la estructura) como al exterior de esta (para mediciones del medioambiente). Esta última se encuentra instalada al exterior de la iglesia, cerca de la entrada, y es la que se analizará para efectos de esta memoria, la cual registra:

- Temperatura ambiental [°C]
- Humedad relativa del aire [%]
- Precipitación [mm]

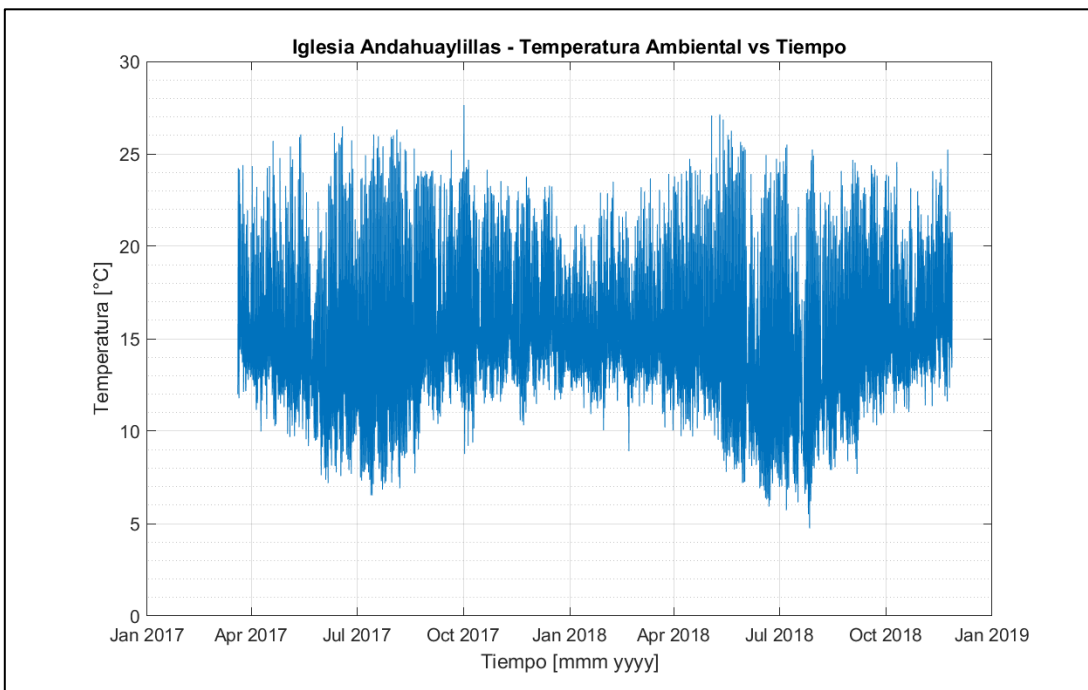
Dado que se requiere también el registro de humedad absoluta, esta se calculará utilizando la Expresión (I) indicada en la sección 2.1. Por otro lado, para obtener registros de precipitación de la zona, se utilizaron datos la estación meteorológica ubicada en Caicay, distrito de la provincia de Paucartambo (Seramhi 2020). La estación meteorológica se encuentra a una distancia de aproximadamente 8.5 kilómetros de la iglesia de Andahuaylillas.

Para cada uno de estos registros ambientales se cuenta con data desde el 20 de marzo del 2017 hasta el 27 de noviembre del 2018. La frecuencia de muestreo de los datos es tal que se reporta un nuevo dato cada 60 minutos. Se tiene que los registros ambientales no presentan ningún valor vacío en toda la extensión de su data, lo que simplifica la etapa de filtrado de componentes.

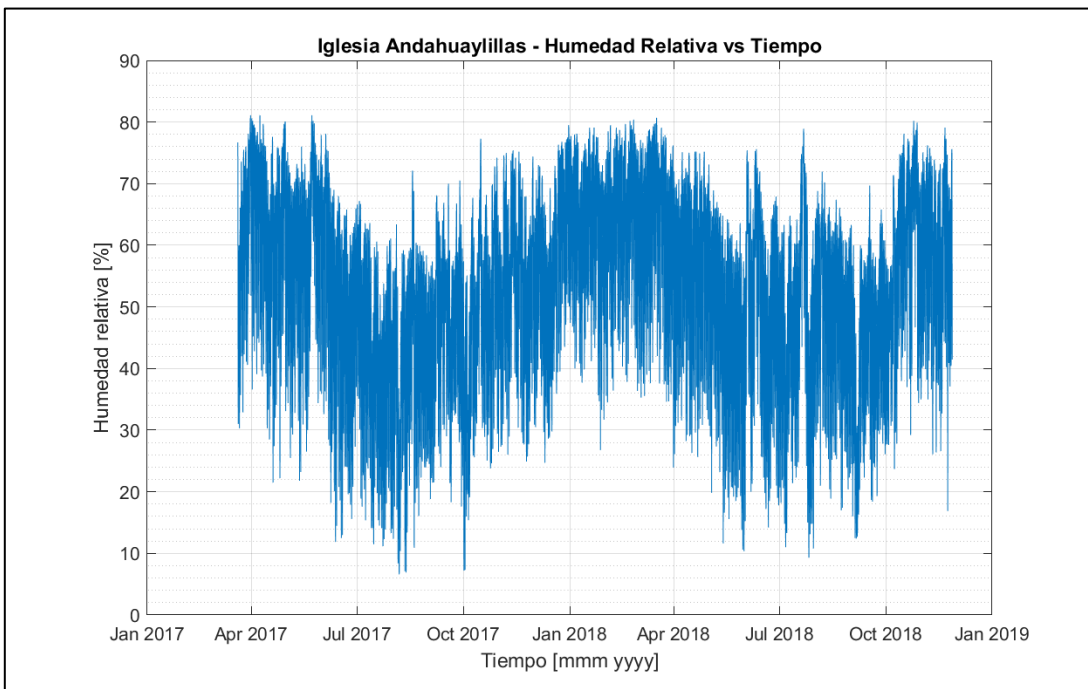
De la Figura 3.18 a la Figura 3.20 se muestran las series de tiempo de las variables ambientales de Temperatura Ambiental, Humedad Relativa y Humedad Absoluta, respectivamente. Notar que se distingue el ciclo estacional de la data para todas las variables anteriores. En la sección A.3.2 de los Anexos se presentan los registros de eventos de lluvia (generados según indicado en la sección 2.1) para la iglesia de Andahuaylillas.

En la Figura 3.21 a la Figura 3.23 se muestra un acercamiento diario a las series de tiempo de temperatura ambiental, humedad relativa y humedad absoluta, respectivamente. Se observa claramente el ciclo de variación diario para la temperatura ambiental y la humedad relativa. Sin embargo, para la humedad absoluta, se logra

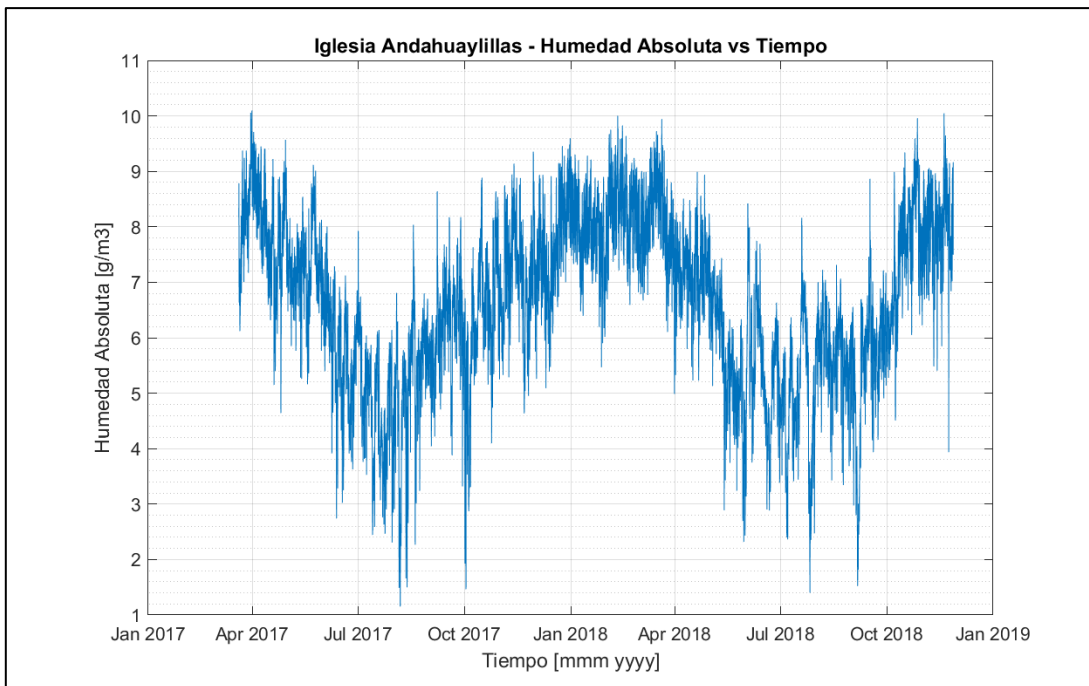
identificar el ciclo diario, pero este no se observa consistentemente para cada intervalo de día del registro (ver Figura 3.23).



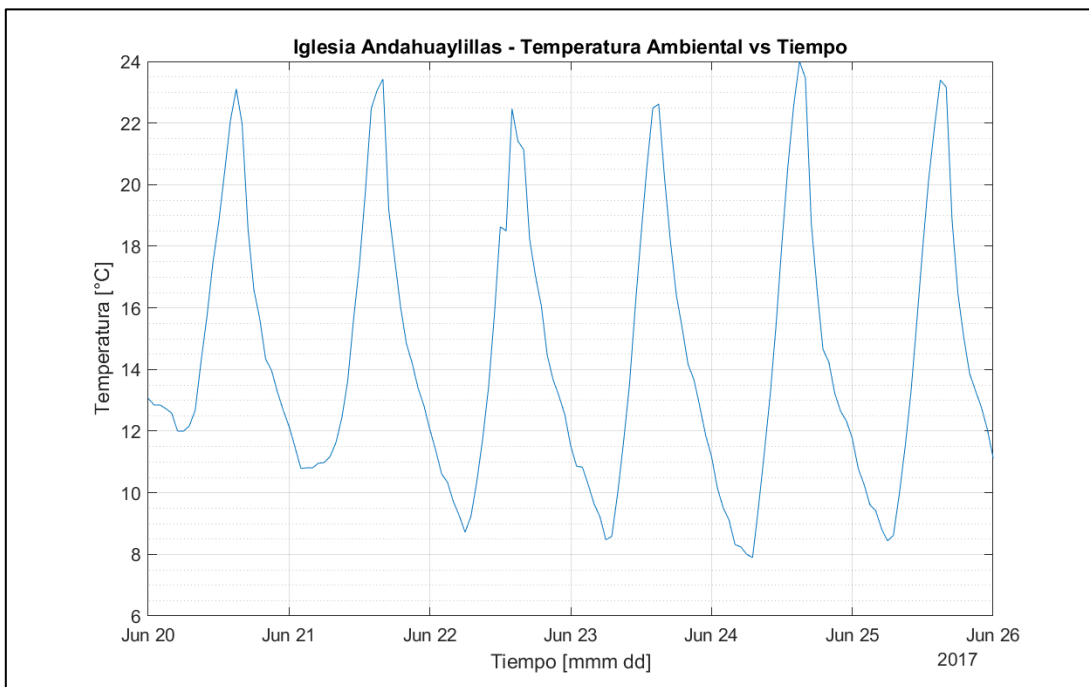
**Figura 3.18: Iglesias Andahuaylillas, registro de temperatura ambiental.**



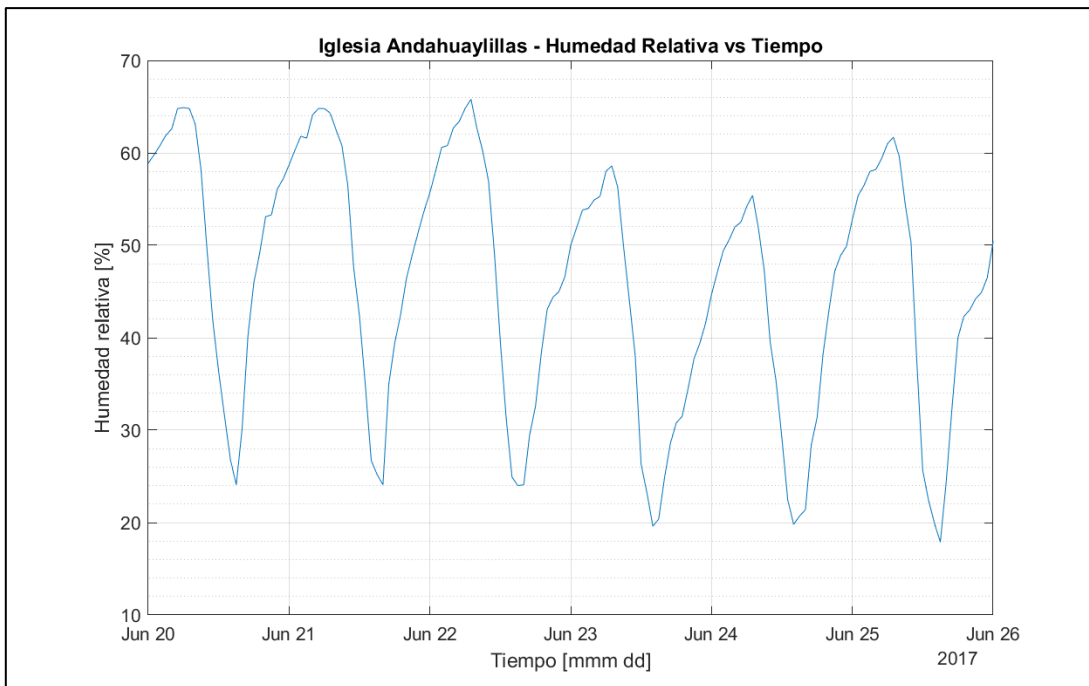
**Figura 3.19: Iglesias Andahuaylillas, registro de humedad relativa.**



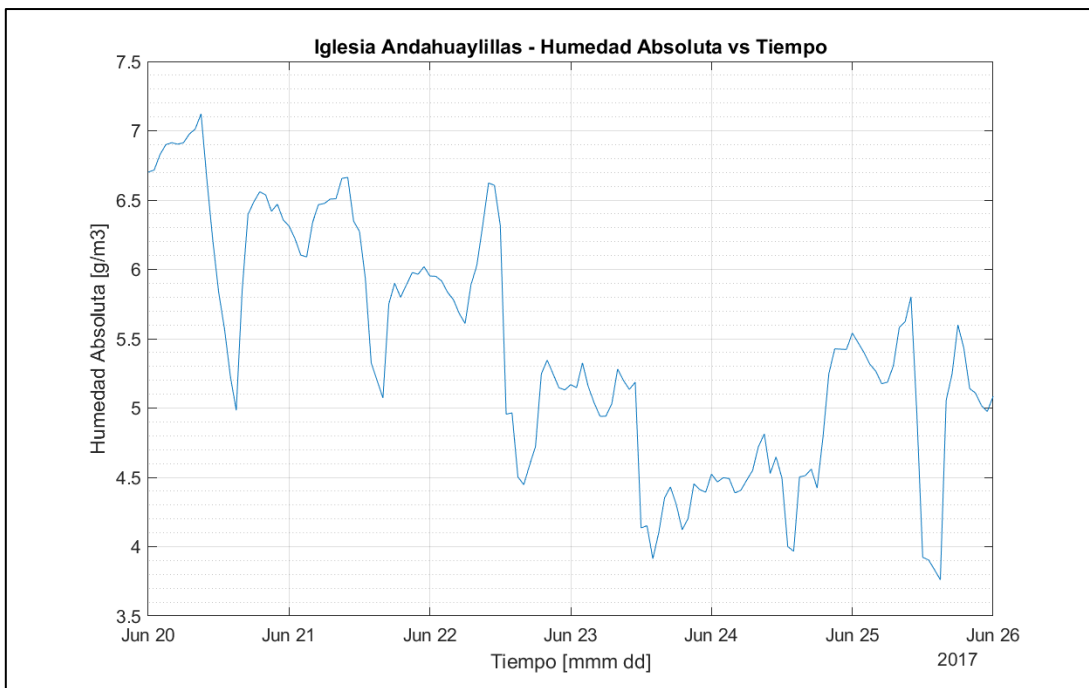
**Figura 3.20: Iglesias Andahuaylillas, registro de humedad absoluta.**



**Figura 3.21: Iglesias Andahuaylillas, variación diaria de la temperatura ambiental. Ventana de tiempo de la serie original, desde 20/jun/2017 hasta 26/jun/2017.**



**Figura 3.22: Iglesia Andahuaylillas, variación diaria de la humedad relativa. Ventana de tiempo de la serie original, desde 20/jun/2017 hasta 26/jun/2017.**



**Figura 3.23: Iglesia Andahuaylillas, variación diaria de la humedad absoluta. Ventana de tiempo de la serie original, desde 20/jun/2017 hasta 26/jun/2017.**

### 3.2.3. Registro Propiedades Modales

El edificio se encuentra instrumentado con una red de 4 acelerómetros uniaxiales ubicados estratégicamente en el edificio (Aguilar et al. 2019), permitiendo registrar la respuesta dinámica de este y poder generar un registro de las propiedades modales, y en particular, de la frecuencia modal del edificio. Los registros de frecuencia modal fueron obtenidos mediante el método SSI-Data (Data-Driven Stochastic Subspace Identification) (Aguilar et al. 2019).

En la Figura 3.24 se muestran el registro de las frecuencias modales del edificio. Se cuentan con datos desde el 20 de marzo del 2017 hasta el 27 de noviembre del 2018. La frecuencia de muestreo de los datos es tal que se reporta un nuevo dato cada 60 minutos. En la Tabla 3.3 se muestra información de cuantos datos vacíos presenta cada frecuencia de vibrar.

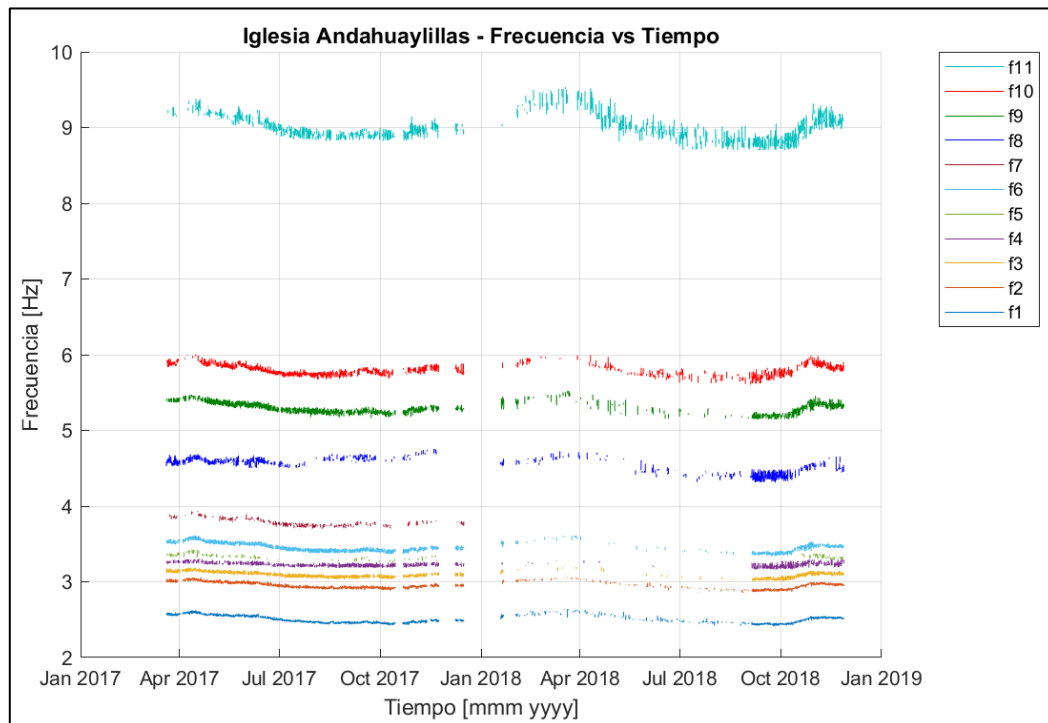


Figura 3.24: Iglesia Andahuaylillas, registro frecuencias modales.

De la Tabla 3.3 se observan que todas las frecuencias modales registradas presentan porcentajes de vacíos de data superiores al 50%, sin embargo, de la Figura 3.24 se observa que parte de los vacíos son datos intermedios y que aún se puede obtener información de las frecuencias modales, a pesar de la cantidad de datos nulos en la data. Se observa un intervalo de vacíos importante presente en todas las frecuencias modales, el cual parte desde la mitad de diciembre del 2017 hasta inicios de septiembre del 2018.

**Tabla 3.3: Iglesia Andahuaylillas, información de número de datos vacíos para cada frec. modal.**

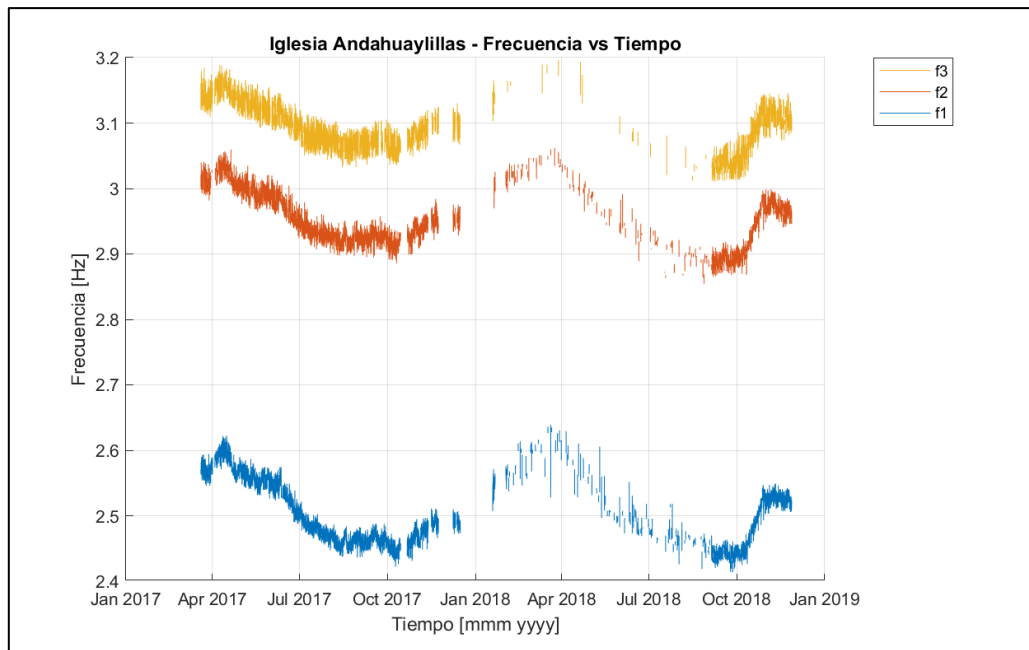
<b>Frecuencia Modal [-]</b>	<b>N° de datos del registro [-]</b>	<b>N° de datos vacíos [-]</b>	<b>Porcentaje de datos vacíos [%]</b>
1	14817	7389	49.9
2	14817	8489	57.3
3	14817	9459	63.8
4	14817	11275	76.1
5	14817	13784	93.0
6	14817	8999	60.7
7	14817	13453	90.8
8	14817	12011	81.1
9	14817	9689	65.4
10	14817	10235	69.1
11	14817	11734	79.2

Para efectos de esta memoria, se trabajarán y analizarán las 3 primeras frecuencias modales de la iglesia de Andahuaylillas (Figura 3.25), dado que son las frecuencias que presentan los menores porcentajes de datos vacíos (respecto a las demás frecuencias modales). Vale notar que en caso anterior (Torre Central), se decidió considerar como aceptable un 35% de valores nulos de data al momento de seleccionar cuantas frecuencias modales se analizarían. Para el caso de esta estructura (Iglesia de Andahuaylillas), se consideró como aceptable un 65%. Como se observará a continuación, no es posible identificar el ciclo diario de la data modal, por lo que solo es posible analizar el ciclo estacional de la data modal. Para estos fines, un porcentaje de un 65% de valores nulos en los registros modales es suficiente para apreciar la forma y variación del ciclo estacional de la data (ver Figura 3.25).

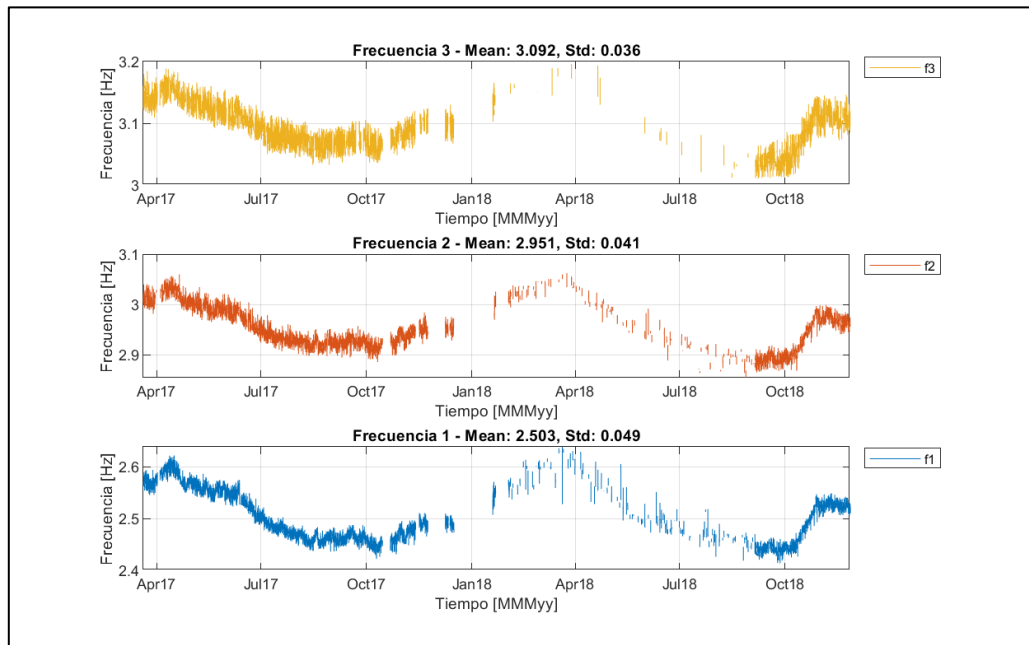
De la Figura 3.25 a la Figura 3.26 se puede identificar la variación estacional de la data, donde cada frecuencia modal presenta su mínimo valor de oscilación a mediados de julio e inicios de octubre, mientras que a inicios de abril se observa el valor máximo de oscilación. Este hecho se comparte entre frecuencias modales. Además, se observa que desde inicios de octubre del 2018 la data presenta un súbito aumento con respecto a la tendencia vista en la misma fecha del año anterior. Se tiene que la magnitud de oscilación del ciclo estacional no necesariamente es igual entre frecuencias modales. A simple vista, el ciclo estacional entre frecuencias presenta la misma fase.

Por otro lado, de la Figura 3.27 a la Figura 3.28 se muestra un acercamiento diario a la data de las 3 primeras frecuencias modales, donde no es posible identificar el comportamiento del ciclo diario para ninguna de las 3 frecuencias modales a analizar. Además, se observa que las variaciones para un acercamiento diario son muy erráticas. Estos hechos pueden deberse al procedimiento utilizado para la identificación modal y su configuración, el cual permite determinar las variaciones estacionales de las frecuencias modales, pero no logra capturar el detalle de la variación diaria. Dado este hecho, el análisis de esta estructura únicamente se enfocará en el ciclo estacional de la data.

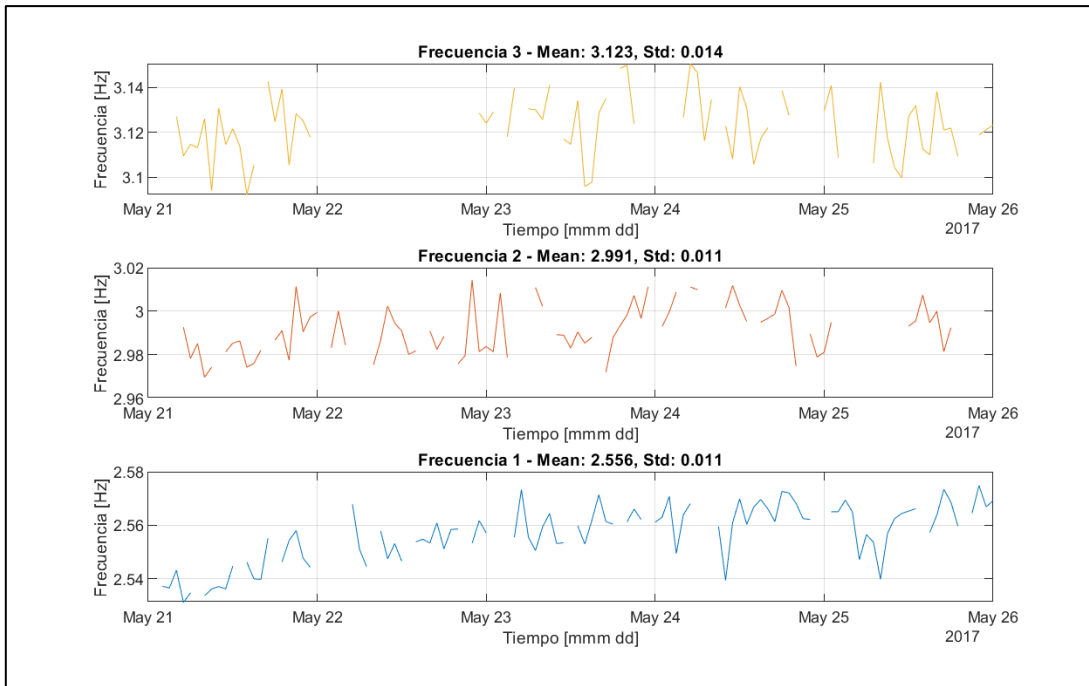




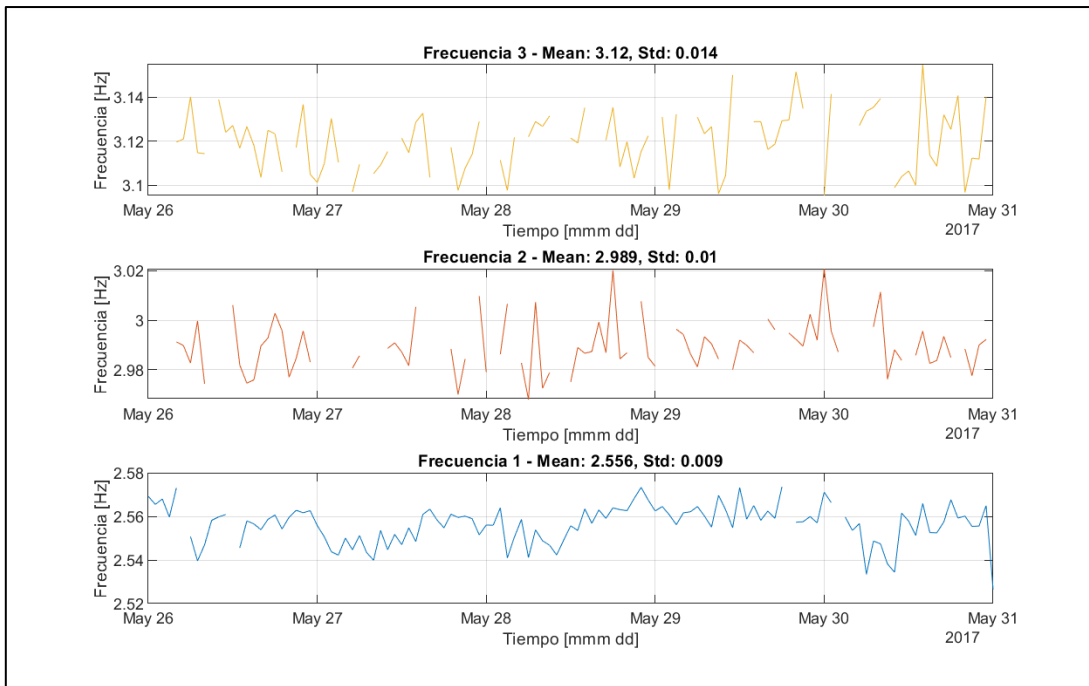
**Figura 3.25: Iglesia Andahuaylillas, frecuencias modales a analizar.**



**Figura 3.26: Iglesia Andahuaylillas, variación estacional de las frec. modales.**



**Figura 3.27: Iglesia Andahuaylillas, variación diaria de las frec. modales. Ventana de tiempo de las series originales, desde 21/may/2017 hasta 26/may/2017.**



**Figura 3.28: Iglesia Andahuaylillas, variación diaria de las frec. modales. Ventana de tiempo de las series originales, desde 26/may/2017 hasta 31/may/2017.**

### 3.3 Iglesia San Juan Bautista de Huaru

#### 3.3.1. Descripción General

Para este subcapítulo, toda la información referente a la iglesia de San Juan Bautista de Huaru proviene de la referencia (Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenco 2019b).

La iglesia de San Juan Bautista de Huaru (Figura 3.29 a la Figura 3.32) está ubicada a 50 kilómetros de la ciudad de Cuzco, Perú, en la localidad de Huaru, pueblo de la provincia de Quispicanchi. Se estima que la iglesia fue construida a entre fines del siglo XVI e inicios del siglo XVII. Destaca por su estilo renacentista e imponentes murales en su interior, los cuales cubren la mayoría de sus muros perimetrales. La iglesia presenta dos sectores principales: una nave central y el presbiterio, ambos separados por un arco triunfal. Por los laterales de la nave central hay presentes 5 capillas laterales. La iglesia presenta a una estructura de albañilería de adobe, principalmente compuesta por muros de adobe de espesor que promedian los 1.6 metros y que presentan una altura promedio de 11 metros. La iglesia se extiende en un área superficial de 60 x 17 metros cuadrados.



Figura 3.29: Iglesia de Huaru, Cara frontal. ([www.rutadelbarrocoandino.com](http://www.rutadelbarrocoandino.com))



Figura 3.30: Iglesia de Huaru, Cara frontal. ([www.tripadvisor.cl](http://www.tripadvisor.cl))



Figura 3.31: Iglesia de Huaru, Interior. ([www.researchgate.net](http://www.researchgate.net))



Figura 3.32: Iglesia de Huaru, Detalle Mural Interior. ([www.rutadelbarrocoandino.com](http://www.rutadelbarrocoandino.com))

### 3.3.2. Condiciones Ambientales

Las condiciones climáticas presentes par la iglesia de Huaro son las mismas condiciones que para la iglesia de Andahuaylillas, dado a su cercanía (aproximadamente 4,5 kilómetros). Estas son, clima templado, donde se presentan lluvias abundantes entre los meses de noviembre a abril, mientras que entre los meses mayo a octubre se presenta un clima más seco.

Para los registros de los datos ambientales, se cuenta con 4 pares de sensores de temperatura y humedad relativa del aire, donde 3 pares fueron instalados dentro de la iglesia (para mediciones de ambiente al interior de la estructura) y 1 par fue instalado al exterior de esta (para mediciones del medioambiente), el cual fue instalada al exterior de la torre de la campana (Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenco 2019b). Para efectos de esta memoria, se analizarán los registros de los sensores ambientales, por lo que se cuenta con registros de:

- Temperatura ambiental [°C]
- Humedad relativa del aire [%]
- Precipitación [mm]

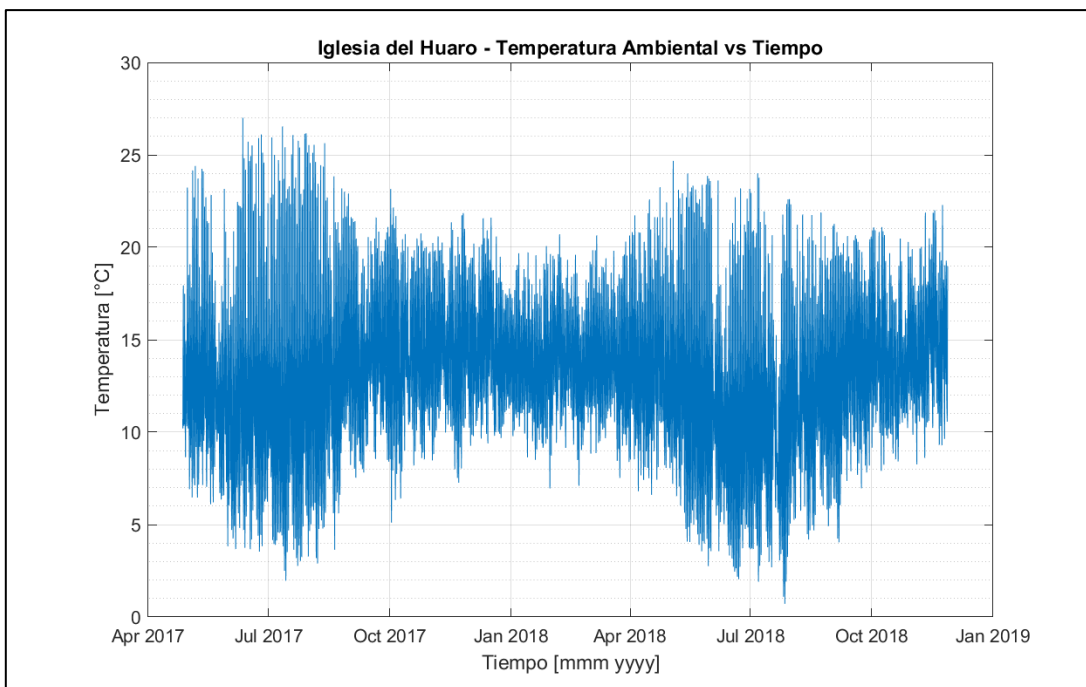
Dado que se requiere también el registro de humedad absoluta, esta se calculará utilizando la Expresión (I) indicada en la sección 2.1. Por otro lado, para obtener registros de precipitación de la zona, se utilizaron datos la estación meteorológica ubicada en Ccatcca, distrito de la provincia de Quispicanchi (Seramhi 2020). La estación meteorológica se encuentra a una distancia de aproximadamente 12.6 kilómetros de la iglesia de Huaro.

Para cada uno de estos registros ambientales se cuenta con data desde el 27 de abril del 2017 hasta el 27 de noviembre del 2018. La frecuencia de muestreo de los datos es tal que se reporta un nuevo dato cada 60 minutos. Se tiene que los registros ambientales no presentan ningún valor vacío en toda la extensión de su data, lo que simplifica la etapa de filtrado de componentes.

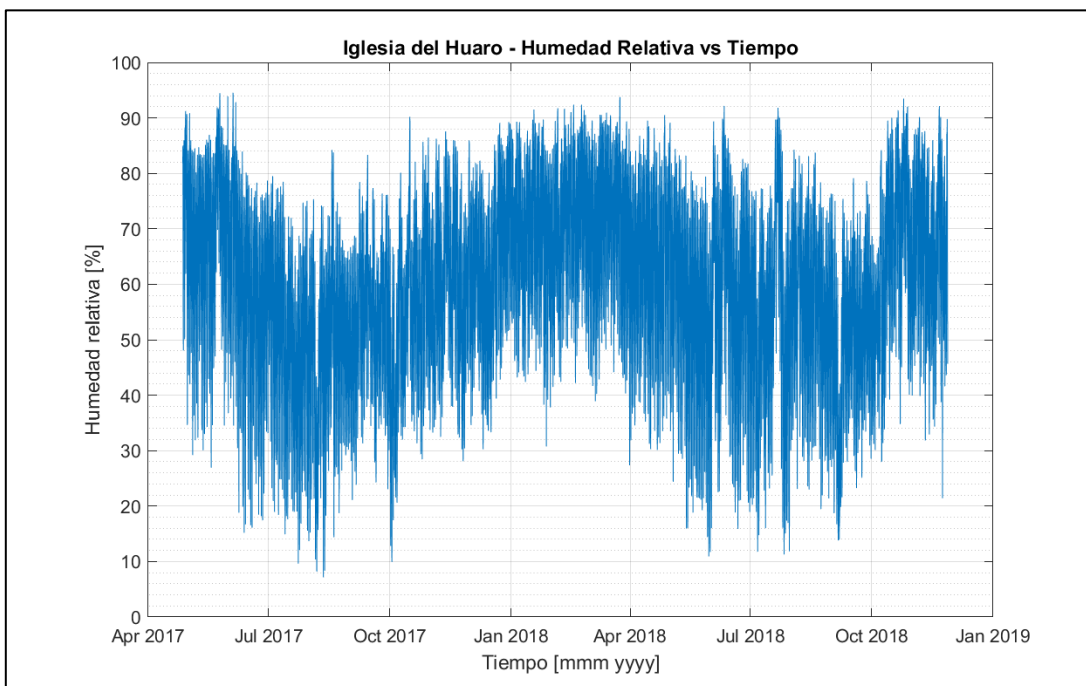
De la Figura 3.33 a la Figura 3.35 se muestran las series de tiempo de las variables ambientales de Temperatura Ambiental, Humedad Relativa y Humedad Absoluta, respectivamente. Notar que se distingue el ciclo estacional de la data para todas las variables anteriores. En la sección A.3.3 de los Anexos se presentan los registros de eventos de lluvia (generados según indicado en la sección 2.1) para la iglesia de Huaro.

En la Figura 3.36 a la Figura 3.38 se muestra un acercamiento diario a las series de tiempo de temperatura ambiental, humedad relativa y humedad absoluta, respectivamente. Se observa claramente el ciclo de variación diario para la temperatura

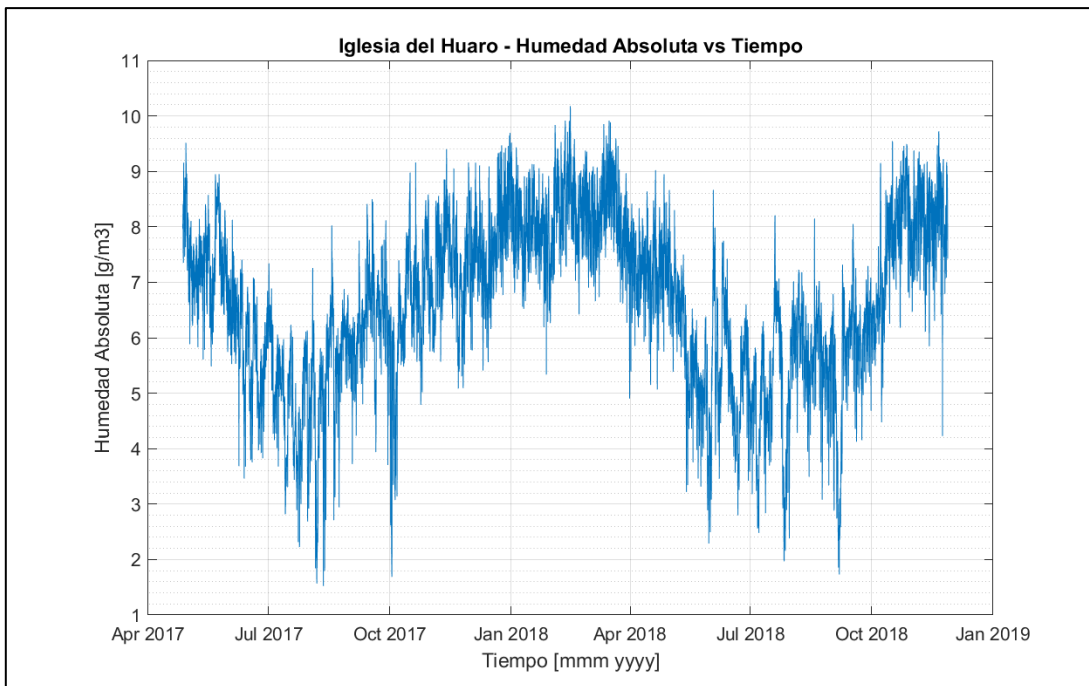
ambiental y la humedad relativa. Sin embargo, para la humedad absoluta, se logra identificar el ciclo diario, pero este no se observa consistentemente para cada intervalo de día del registro (ver Figura 3.38).



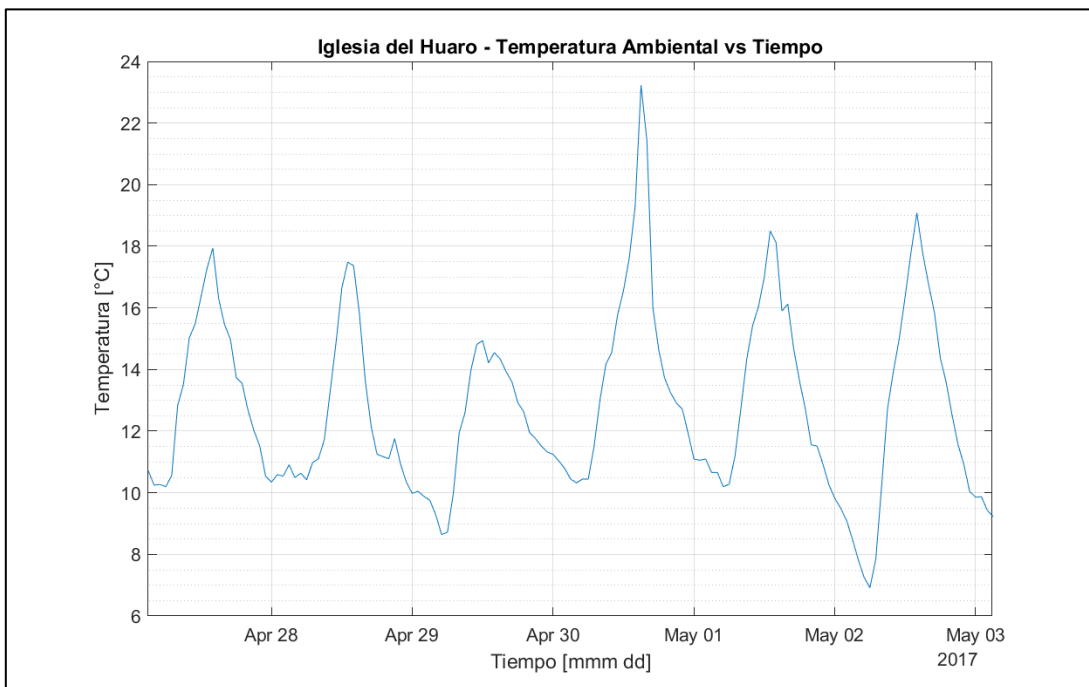
**Figura 3.33: Iglesia de Huaro, registro de temperatura ambiental.**



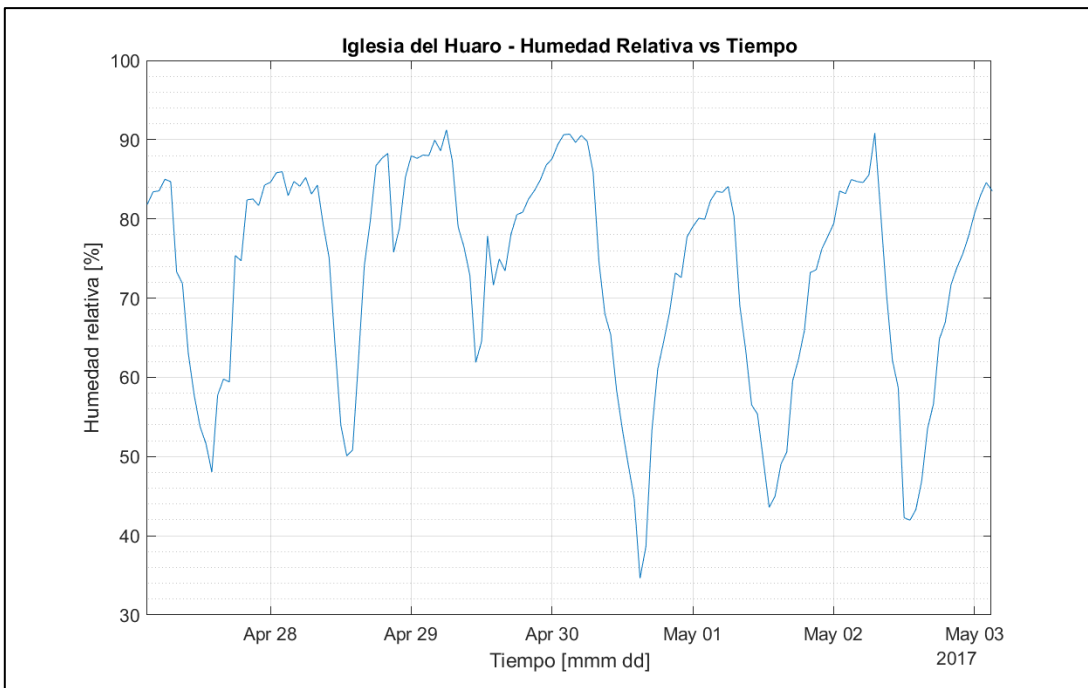
**Figura 3.34: Iglesia de Huaro, registro de humedad relativa.**



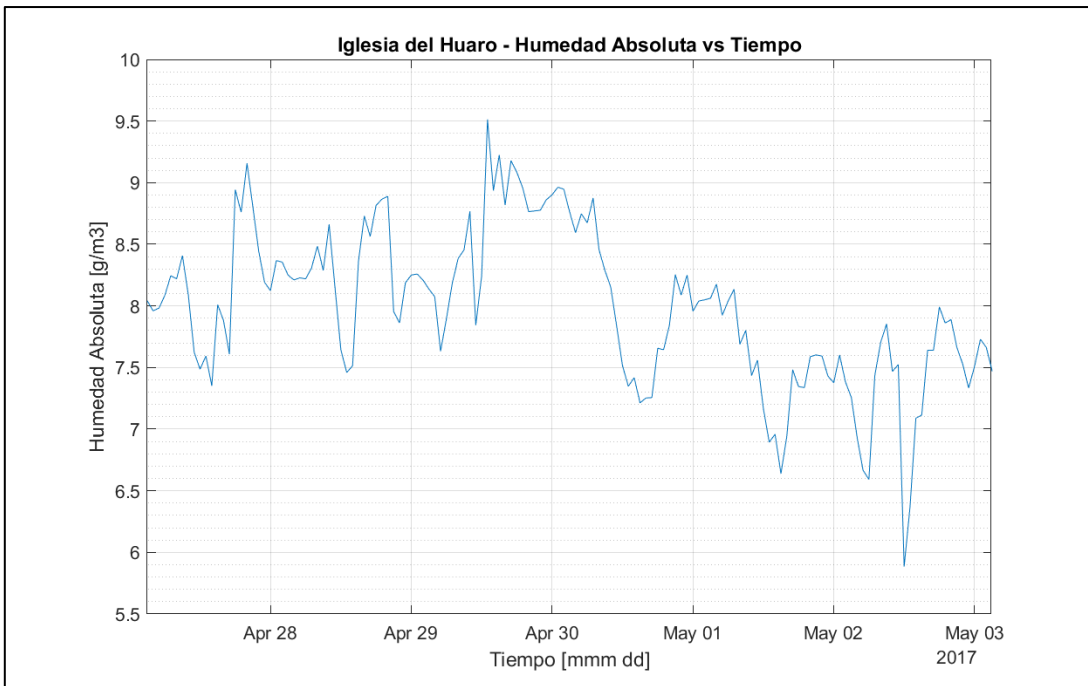
**Figura 3.35: Iglesia de Huaro, registro de humedad absoluta.**



**Figura 3.36: Iglesia de Huaro, variación diaria de la temperatura ambiental. Ventana de tiempo de la serie original, desde 27/abr/2017 hasta 03/may/2017.**



**Figura 3.37: Iglesia de Huaro, variación diaria de la humedad relativa. Ventana de tiempo de la serie original, desde 27/abr/2017 hasta 03/may/2017.**



**Figura 3.38: Iglesia de Huaro, variación diaria de la humedad absoluta. Ventana de tiempo de la serie original, desde 27/abr/2017 hasta 03/may/2017.**

### 3.3.3. Registro Propiedades Modales

El edificio se encuentra instrumentado con una red de 4 acelerómetros uniaxiales ubicados estratégicamente en el edificio, permitiendo registrar la respuesta dinámica de este y poder generar un registro de las propiedades modales, y en particular, de la frecuencia modal del edificio (Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenco 2019b). Los registros de frecuencia modal fueron obtenidos mediante el método SSI-Data (Data-Driven Stochastic Subspace Identification) (Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenco 2019b).

En la Figura 3.39 se muestran el registro de las frecuencias modales del edificio. Se cuentan con datos desde el 27 de abril del 2017 hasta el 27 de noviembre del 2018. La frecuencia de muestreo de los datos es tal que se reporta un nuevo dato cada 60 minutos. En la Tabla 3.4 se muestra información de cuantos datos vacíos presenta cada frecuencia de vibrar.

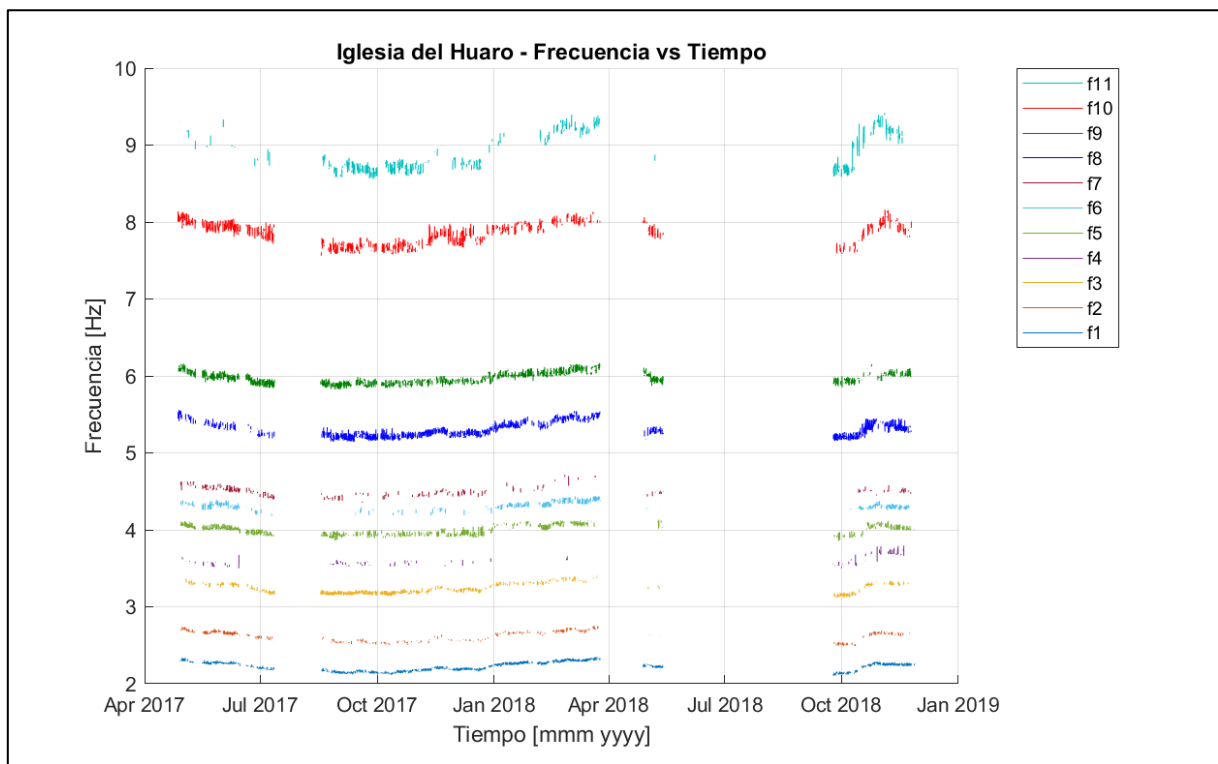


Figura 3.39: Iglesia de Huaro, registro frecuencias modales.



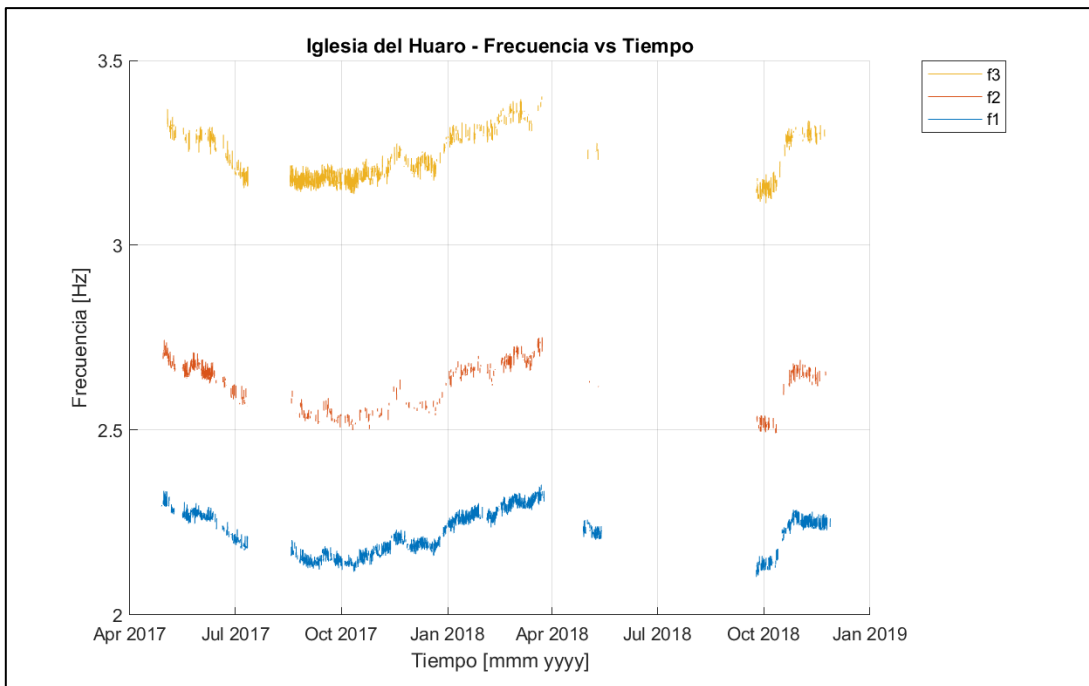
**Tabla 3.4: Iglesia de Huaro, información de número de datos vacíos para cada frec. modal.**

<b>Frecuencia Modal [-]</b>	<b>N° de datos del registro [-]</b>	<b>N° de datos vacíos [-]</b>	<b>Porcentaje de datos vacíos [%]</b>
1	13907	9221	66.3
2	13907	11933	85.8
3	13907	11249	80.9
4	13907	13181	94.8
5	13907	11035	79.3
6	13907	12090	86.9
7	13907	12664	91.1
8	13907	10534	75.7
9	13907	10542	75.8
10	13907	11274	81.1
11	13907	12398	89.1

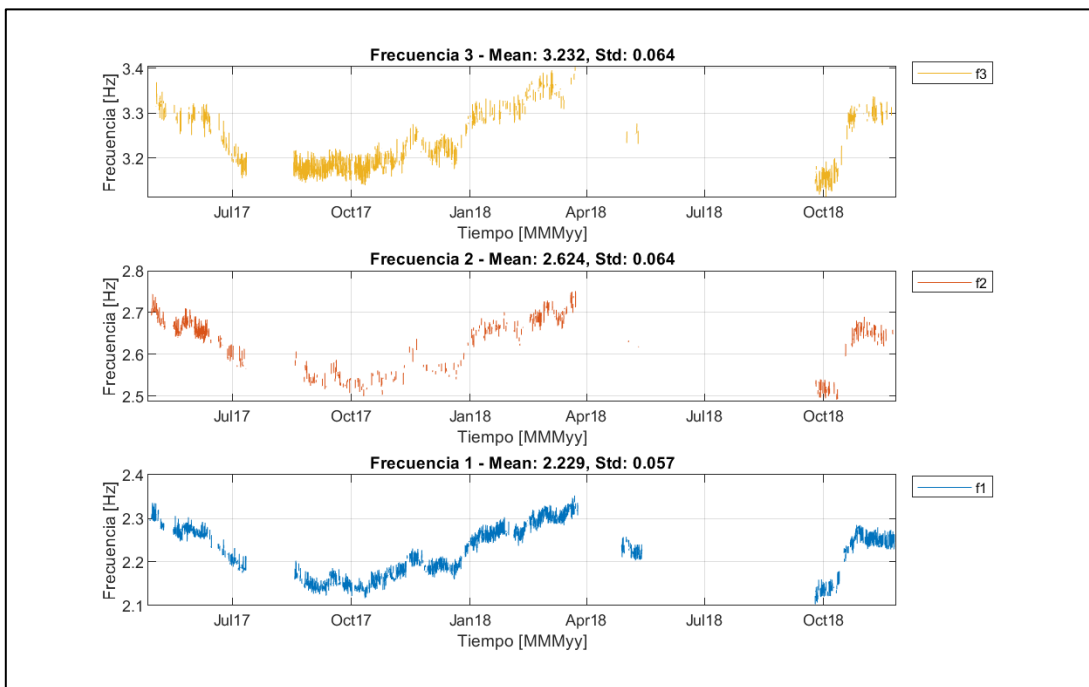
De la Tabla 3.4 se observan que todas las frecuencias modales registradas presentan porcentajes de vacíos de data superiores al 65%, sin embargo, de la Figura 3.39 se observa que aún se puede obtener información del comportamiento de las frecuencias modales. Se observan dos intervalos de vacíos importantes presentes en todas las frecuencias modales, uno que parte desde mitad de julio del 2017 hasta mitad de agosto del 2017, y el otro que inicia a finales de marzo del 2018 hasta finales de septiembre del 2018. Para efectos de esta memoria, se trabajarán y analizarán las 3 primeras frecuencias modales de la iglesia de Andahuaylillas (Figura 3.40). Tal como el caso anterior (iglesia Andahuaylillas), se aceptará un porcentaje de vacío importante en los registros modales, dado que como se verá más adelante, solo se analizará los ciclos estacionales de la data.

De la Figura 3.40 a la Figura 3.41 se puede identificar la variación estacional de la data, donde cada frecuencia modal presenta su mínimo valor de oscilación a mediados de julio e inicios de octubre, mientras que a inicios de abril se observa el valor máximo de oscilación. Este hecho se comparte entre frecuencias modales. Además, se observa que desde inicios de octubre del 2018 la data presenta un súbito aumento con respecto a la tendencia vista en la misma fecha del año anterior. Se tiene que la amplitud de oscilación del ciclo estacional coincide entre las 3 primeras frecuencias modales, hecho que no se mantiene al compararlas contra las demás frecuencias modales (ver Figura 3.39). A simple vista, el ciclo estacional entre frecuencias presenta la misma fase.

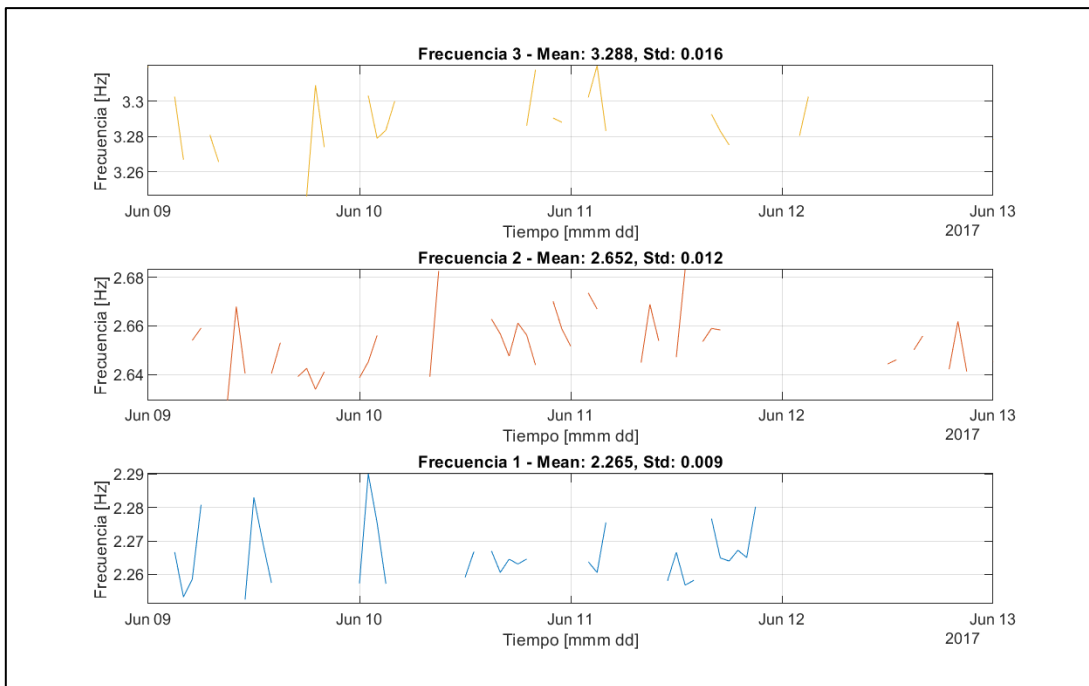
Por otro lado, de la Figura 3.42 a la Figura 3.43 se muestra un acercamiento diario a la data de las 3 primeras frecuencias modales, donde no es posible identificar el comportamiento del ciclo diario para ninguna de las 3 frecuencias modales a analizar, tal como en el caso de la Iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas. Dado este hecho, el análisis de esta estructura únicamente se enfocará en el ciclo estacional de la data.



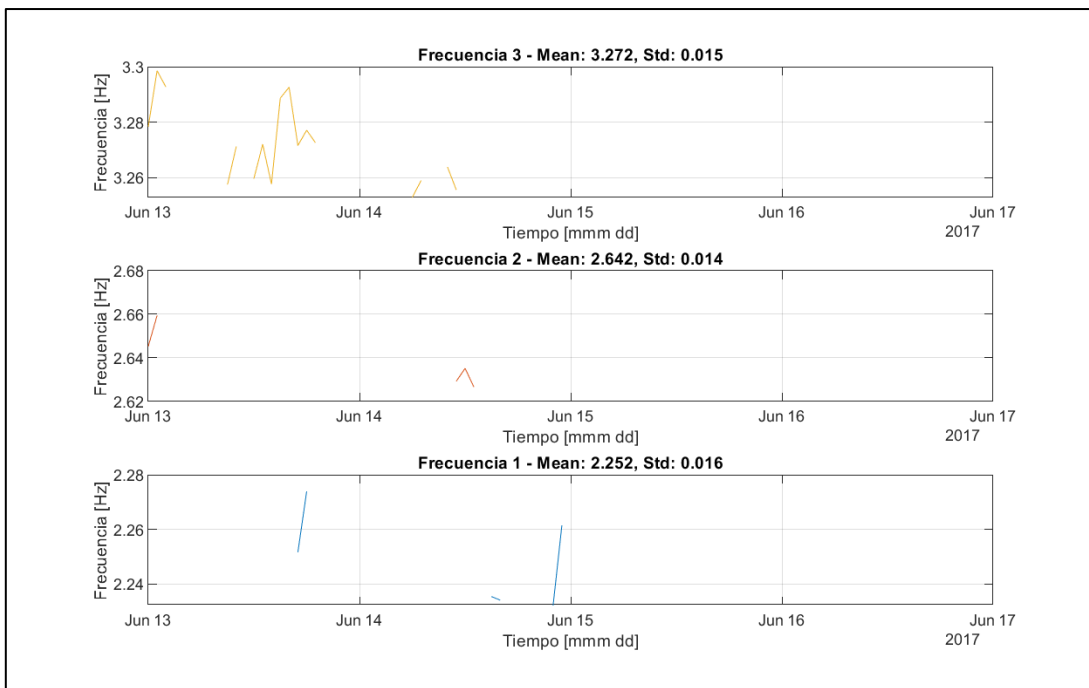
**Figura 3.40: Iglesia de Huaro, frecuencias modales a analizar.**



**Figura 3.41: Iglesia de Huaro, variación estacional de las frec. modales.**



**Figura 3.42: Iglesia de Huaro, variación diaria de las frec. modales. Ventana de tiempo de las series originales, desde 09/jun/2017 hasta 13/jun/2017.**



**Figura 3.43: Iglesia de Huaro, variación diaria de las frec. modales. Ventana de tiempo de las series originales, desde 13/jun/2017 hasta 17/jun/2017.**

### 3.4 Muros de Adobe de Laboratorio

#### 3.4.1. Descripción General

Para este subcapítulo, toda la información referente a los muros de albañilería de adobe de laboratorio de la Pontificia Universidad Católica del Perú proviene de las referencias (Aguilar et al. 2019; Milton 2017).

Se cuenta con 3 muros de albañilería de adobe (Figura 3.44 a la Figura 3.45), los cuales corresponden a estructuras construidas en laboratorio por parte de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), con el propósito de monitoreo e investigación científica. La universidad se encuentra ubicada en Lima, Perú, en el distrito de San Miguel. Los 3 muros están contruidos mediante unidades de adobe (del mismo material entre sí) asentadas y unidas mediante mortero. Cada muro presenta el mismo valor de altura y ancho, mientras que el valor de espesor de cada muro varía entre cada uno. Las dimensiones de cada muro se muestran en la Tabla 3.5. A cada muro se le denominará muro tipo I, II o III, dependiendo del espesor que presente. Cada muro está construido sobre una cimentación de concreto de 20 centímetros de altura, y presenta el mismo ancho y espesor de cada muro. Esta cimentación asegura que no se filtre humedad del muro hacia el suelo. A medida que se construía cada muro, se instalaron sensores de temperatura y humedad al interior de los muros y en diferentes posiciones (ver Figura 3.44). Además, se instalaron acelerómetros en la superficie de cada muro para registrar la respuesta dinámica de estos.



Figura 3.44: Muros Adobe, lugar y equipo de monitoreo (Milton 2017).



Figura 3.45: Muros Adobe, lugar y equipo de monitoreo (Milton 2017).

Tabla 3.5: Muros Adobe, especificación de dimensiones de cada muro.

Tipo de Muro	Espesor [m]	Alto [m]	Ancho [m]
Muro Tipo I	0.22	2.00	1.66
Muro Tipo II	0.56	2.00	1.66
Muro Tipo III	0.80	2.00	1.66

### 3.4.2. Condiciones Ambientales

Las condiciones climáticas a la que se ven expuestos los muros corresponden a un clima templado, con temperaturas estables durante todo el año, donde no se presentan veranos muy calurosos ni inviernos muy fríos. La presencia de lluvias en el año es muy baja o nula. La humedad relativa es un factor importante, la cual se mantiene alta y presente durante todo el año.

Para las mediciones de los registros ambientales, se instalaron sensores de temperatura y humedad tanto dentro del muro como a las cercanías de los muros. Debido a los alcances de esta memoria, únicamente se trabajará con la data de los registros ambientales, y no se trabajará con los registros de temperatura o humedad interna en el muro. De los registros ambientales, se tiene data de los siguientes parámetros:

- Temperatura ambiental [°C]
- Humedad relativa del aire [%]

Dado que se requiere también el registro de humedad absoluta, esta se calculará utilizando la Expresión (I) indicada en la sección 2.1. Para esta estructura, no se trabajará con registros de precipitación.

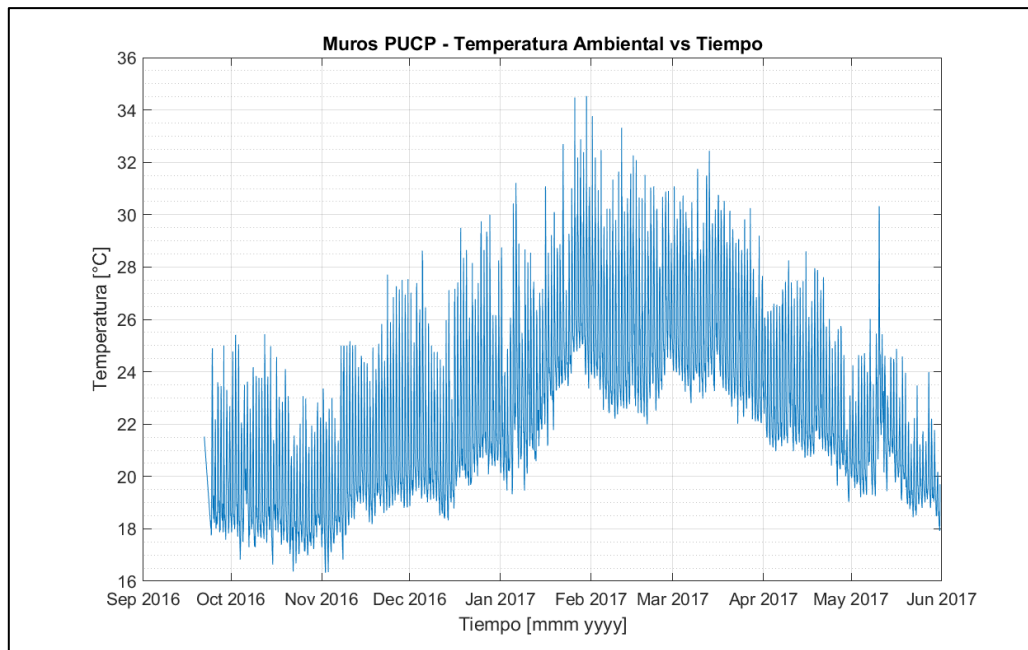
Para cada uno de estos registros ambientales se cuenta con data desde el 21 de septiembre del 2017 hasta el 31 de mayo del 2018. La frecuencia de muestreo de los datos es tal que se reporta un nuevo dato cada 60 minutos. Se tiene que los registros ambientales no presentan ningún valor vacío en toda la extensión de su data, lo que simplifica la etapa de filtrado de componentes.

De la Figura 3.46 a la Figura 3.48 se muestran las series de tiempo de las variables ambientales de Temperatura Ambiental, Humedad Relativa y Humedad Absoluta, respectivamente. En particular, el registro de humedad absoluta presenta una alta variación de datos entre marzo y abril del 2017. A modo de no modificar la data original y no generar datos vacíos en la señal (lo cuales disminuyen la calidad del filtrado), estos valores no se eliminarán, pero se tendrá en cuenta este rango al momento del análisis de resultados.

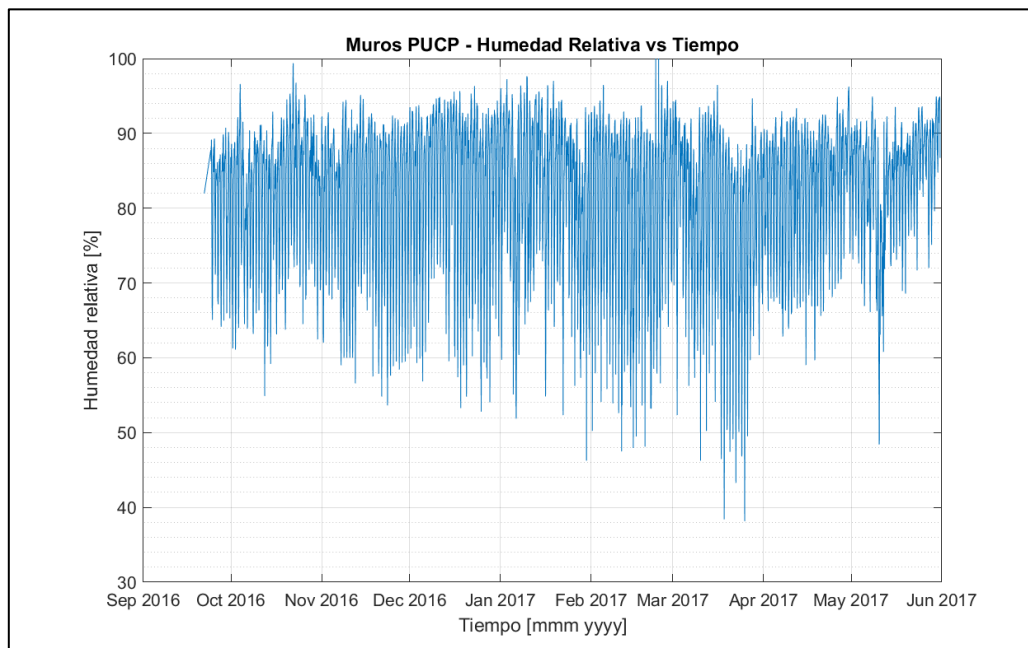
Notar que se distingue el ciclo estacional de la data para la señal de temperatura y humedad absoluta, sin embargo, dado que los registros no cubren un año completo, no se puede apreciar el ciclo completo.

En la Figura 3.49 a la Figura 3.51 se muestra un acercamiento diario a las series de tiempo de temperatura ambiental, humedad relativa y humedad absoluta,

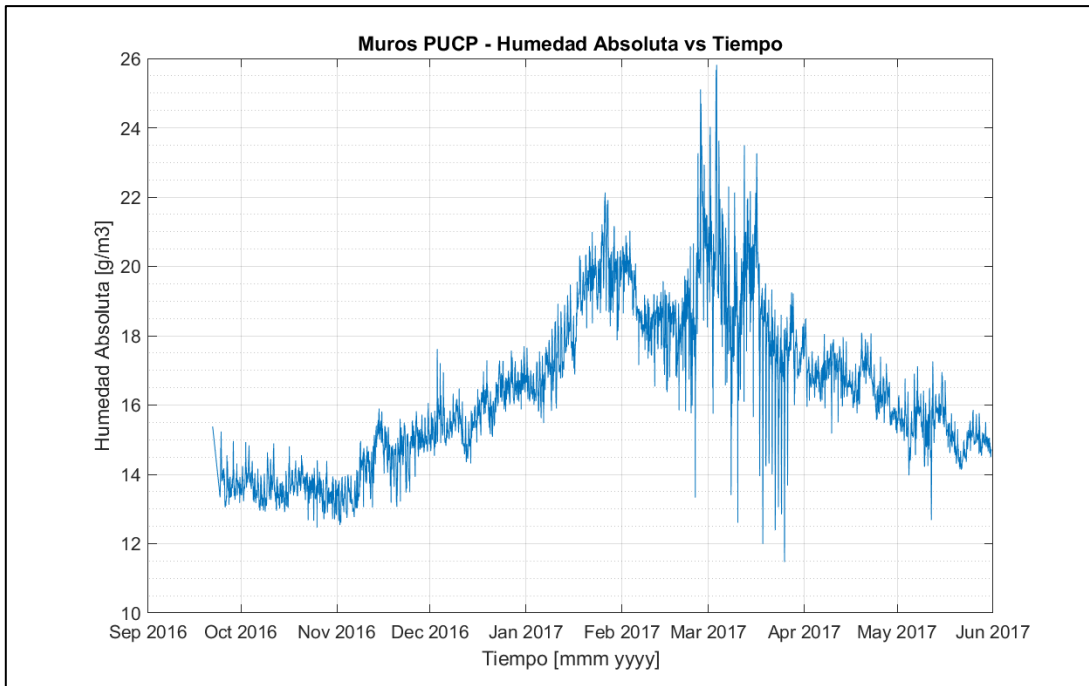
respectivamente. Se observa claramente el ciclo de variación diario para la temperatura ambiental y la humedad relativa. Sin embargo, para la humedad absoluta, no se logra identificar el ciclo diario (ver Figura 3.51).



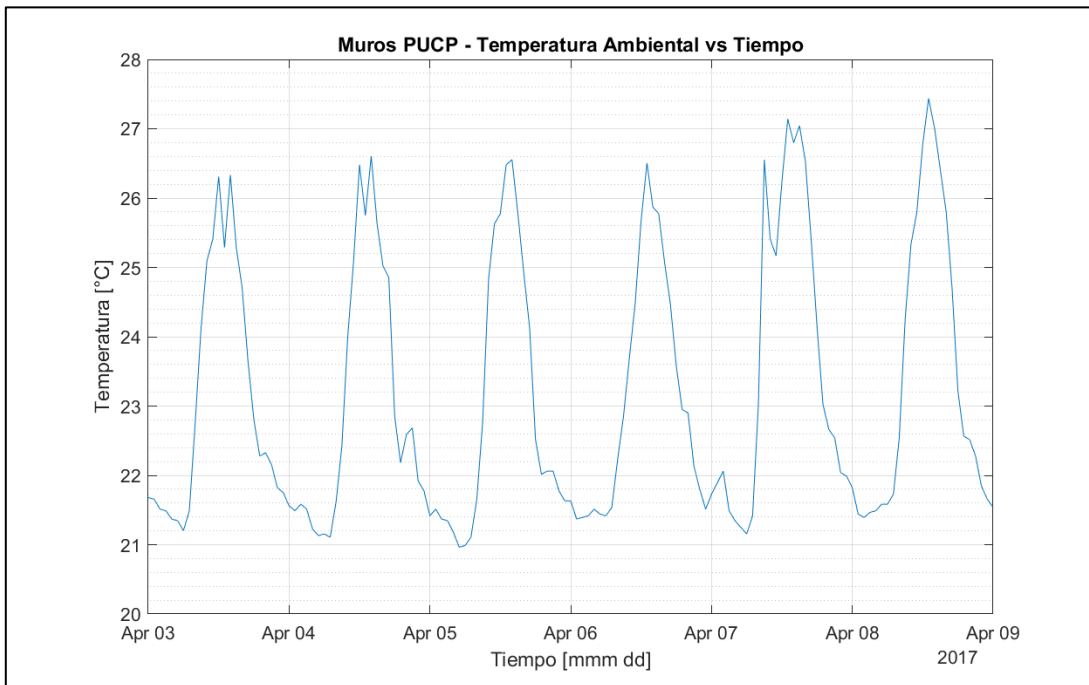
**Figura 3.46: Muros PUCP, registro de temperatura ambiental.**



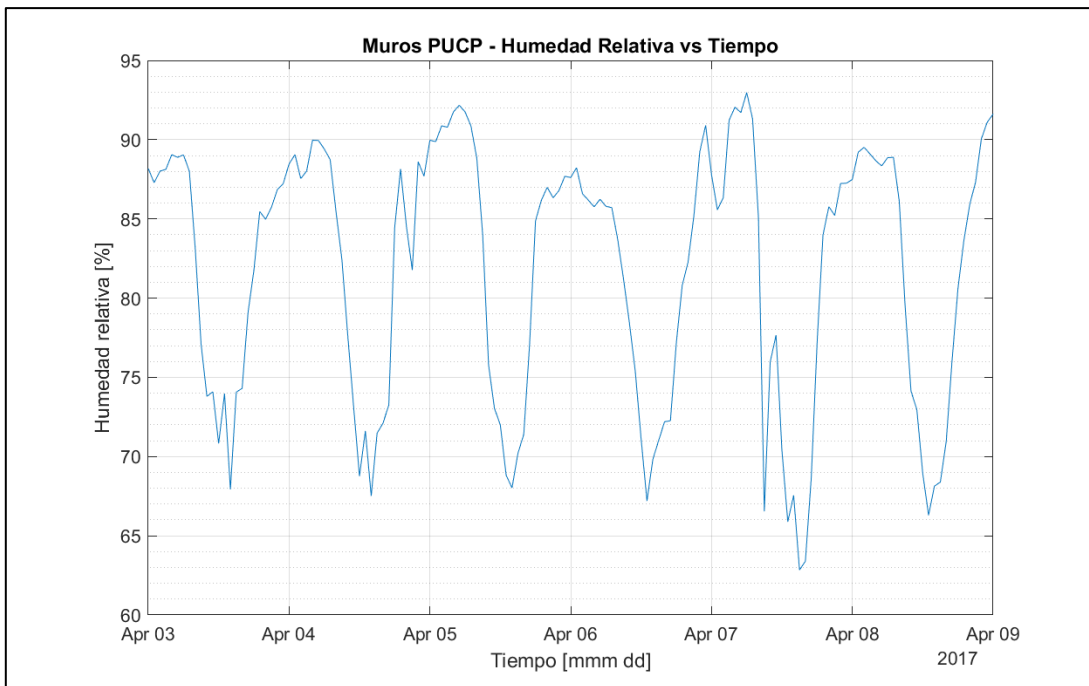
**Figura 3.47: Muros PUCP, registro de humedad relativa.**



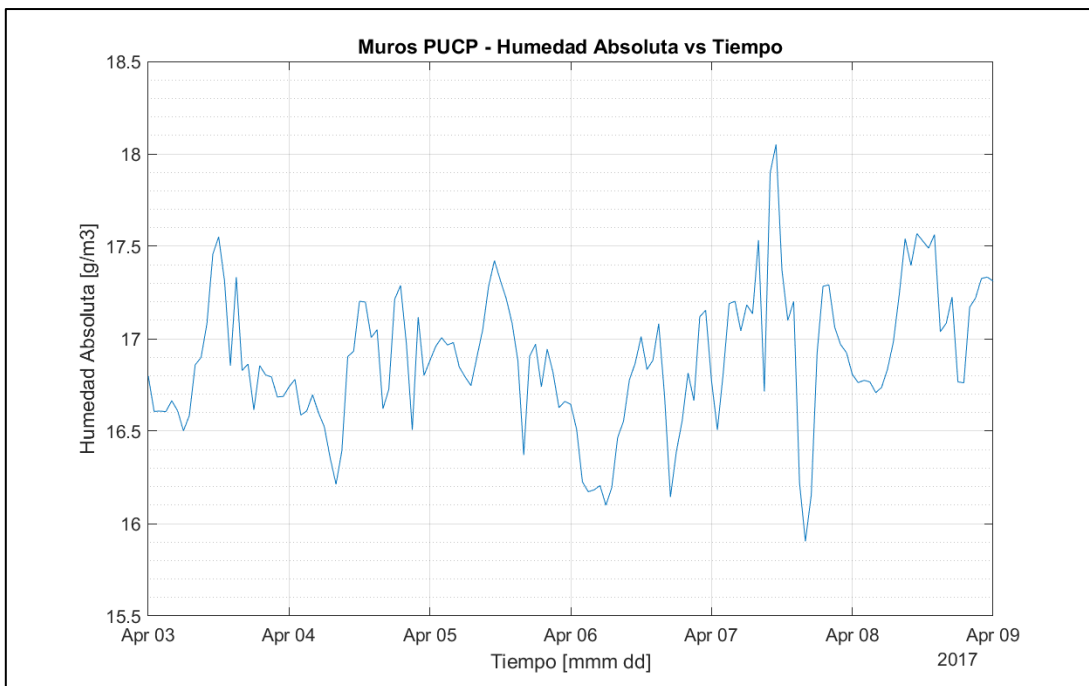
**Figura 3.48: Muros PUCP, registro de humedad absoluta.**



**Figura 3.49: Muros PUCP, variación diaria de la temperatura ambiental. Ventana de tiempo de la serie original, desde 03/apr/2017 hasta 09/apr/2017.**



**Figura 3.50: Muros PUCP, variación diaria de la humedad relativa. Ventana de tiempo de la serie original, desde 03/apr/2017 hasta 09/apr/2017.**



**Figura 3.51: Muros PUCP, variación diaria de la humedad absoluta. Ventana de tiempo de la serie original, desde 03/apr/2017 hasta 09/apr/2017.**



### 3.4.3. Registro Propiedades Modales – Muro tipo I

El muro cuenta con 3 acelerómetros uniaxiales instalados en su superficie. Los registros de frecuencia modal fueron obtenidos mediante el método SSI-Data (Data-Driven Stochastic Subspace Identification) (Milton 2017).

Los acelerómetros del muro comenzaron a registrar datos apenas se terminó la construcción del muro: esto con el objetivo de registrar los parámetros modales del muro y su variación mientras simultáneamente ocurría el proceso de secado y endurecimiento del sistema. El sistema se endurece principalmente debido al mortero fresco que se utiliza para unir las unidades del abobe, dado que este se va secando y ganando resistencia.

En la Figura 3.52 se muestran el registro de las frecuencias modales del muro. Se cuentan con datos desde el 21 de septiembre del 2016 hasta el 31 de mayo del 2017. La frecuencia de muestreo de los datos es tal que se reporta un nuevo dato cada 60 minutos. En la Tabla 3.6 se muestra información de cuantos datos vacíos presenta cada frecuencia de vibrar.

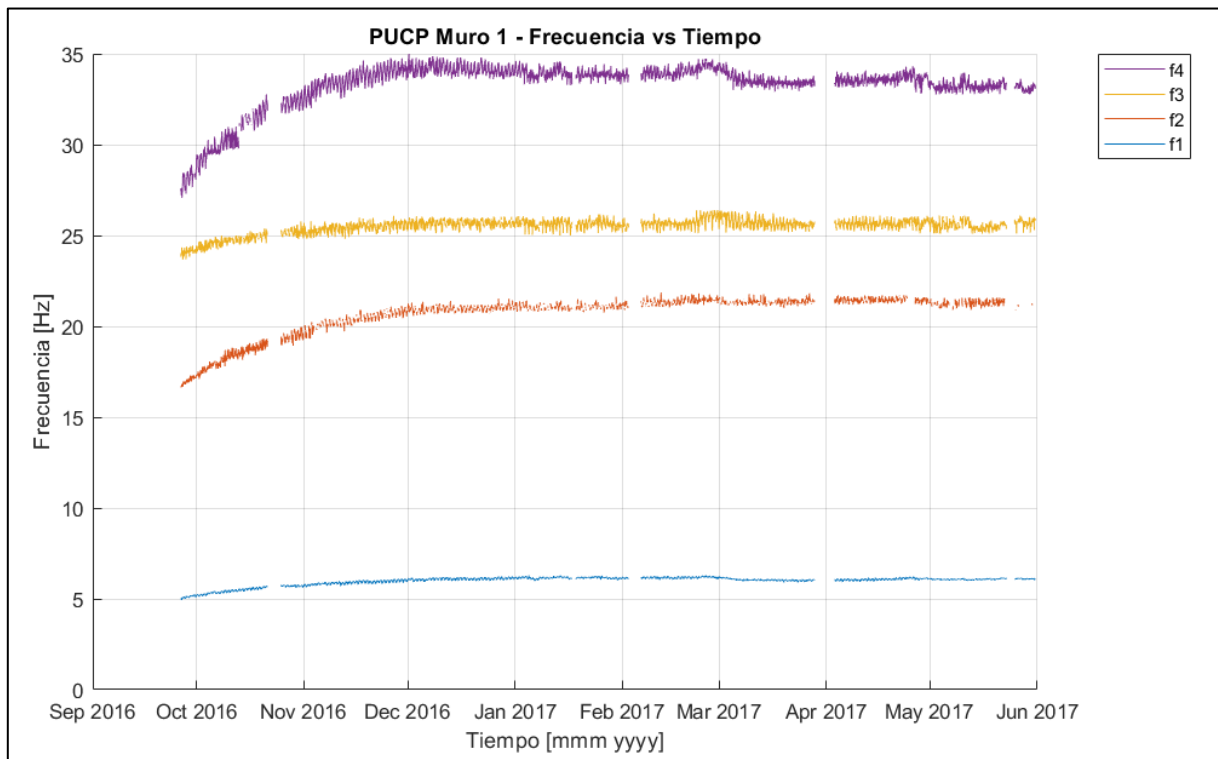


Figura 3.52: Muro tipo I, registro frecuencias modales.

**Tabla 3.6: Muro tipo I, información de número de datos vacíos para cada frec. modal.**

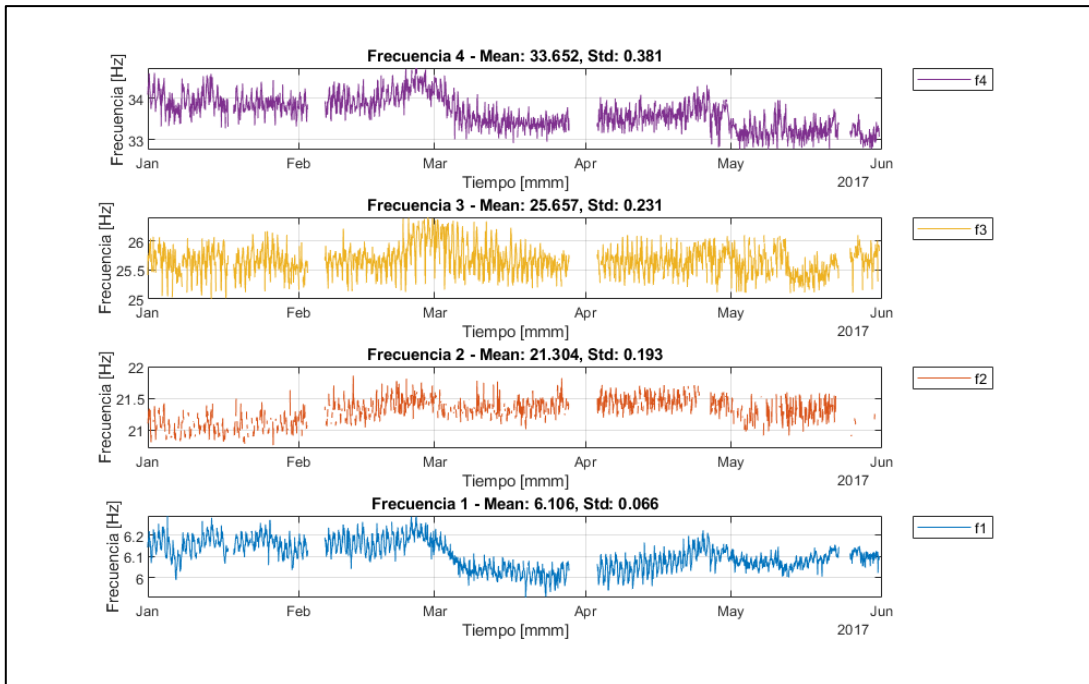
<b>Frecuencia Modal [-]</b>	<b>N° de datos del registro [-]</b>	<b>N° de datos vacíos [-]</b>	<b>Porcentaje de datos vacíos [%]</b>
1	5986	531	8.9
2	5986	2224	37.2
3	5986	828	13.8
4	5986	624	10.4

Se tiene que todas las frecuencias modales presentan bajos porcentajes de data vacía, a excepción de la segunda frecuencia modal, con un 37.2% de data vacía. Se observan tres intervalos menores de vacíos presentes en todas las frecuencias modales. Para efectos de esta memoria, se trabajará y analizarán las 4 primeras frecuencias modales del muro tipo I (Figura 3.52), dado que todas las frecuencias presentan niveles manejables de porcentajes de datos vacíos.

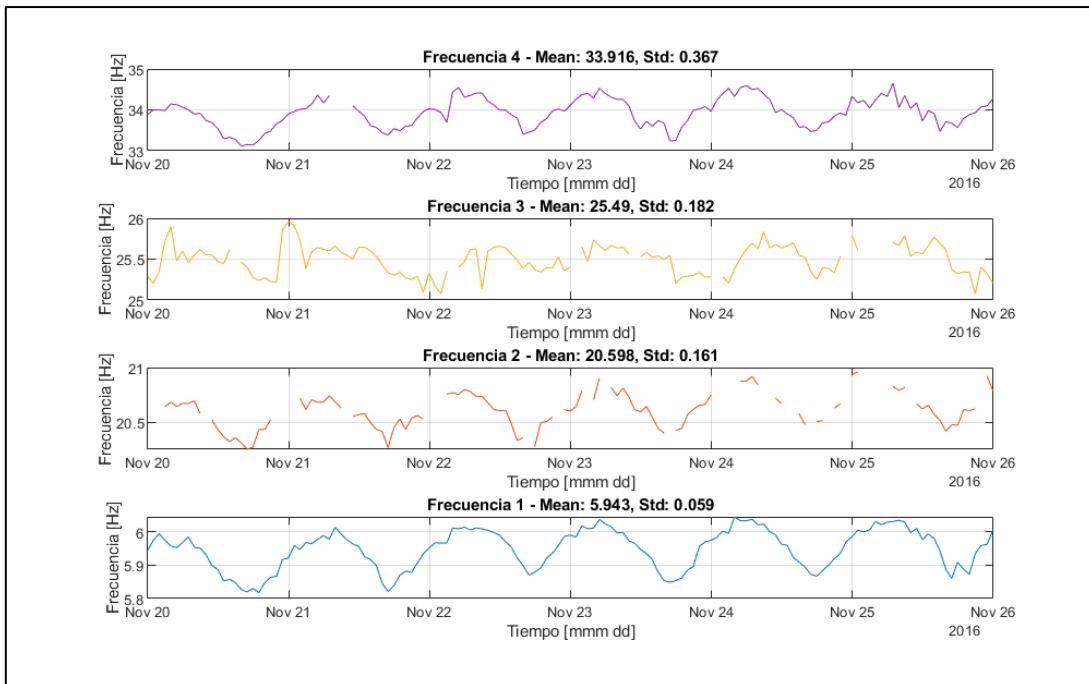
En la Figura 3.52 se observa el proceso de endurecimiento del muro, el cual está presente en todas las frecuencias modales. En la Figura 3.53 se hace un acercamiento al final del registro, donde las frecuencias modales se encuentran estabilizadas. En esta figura se observa un salto en la magnitud de todas las frecuencias modales, el cual ocurre a inicios de marzo de 2017. Estos cambios pueden estar vinculados a variaciones de humedad absoluta (Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenço 2019), dado existe una subida de humedad absoluta en marzo del 2017 que coincide con las subidas de las frecuencias modales mencionadas.

Debido a la presencia del proceso de endurecimiento en la data modal, no se realizará la comparación estacional en el caso de los muros, dado que se cuenta únicamente con 4-5 meses de data modal pasada el proceso de endurecimiento, la que no es data suficiente para poder identificar la variación estacional en los registros.

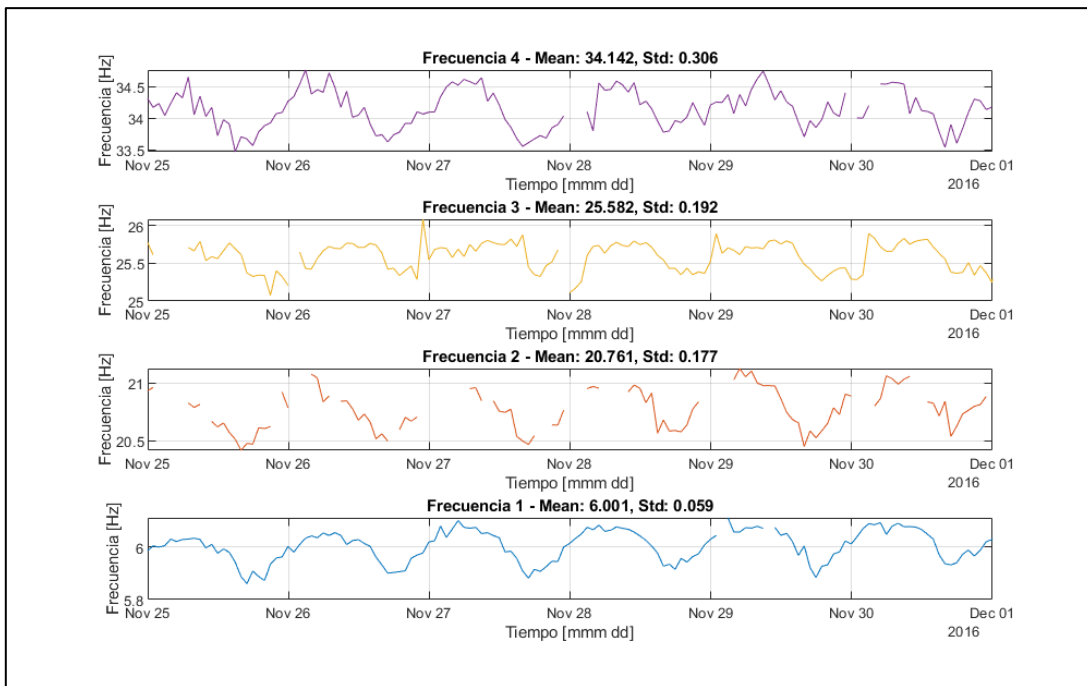
Por otro lado, de la Figura 3.54 a la Figura 3.55 se muestra un acercamiento diario a la data de las 4 primeras frecuencias modales, donde se observa la variación diaria que presentan los registros. Se tiene que la magnitud de oscilación del ciclo diario no necesariamente es igual entre frecuencias modales. Tampoco es directo asegurar que la variación diaria presente exactamente la misma fase entre frecuencias modales.



**Figura 3.53: Muro tipo I, frecuencias modales a analizar. Ventana de tiempo de las series originales, desde 01/jan/2017 hasta 01/jun/2017.**



**Figura 3.54: Muro tipo I, variación diaria de las frec. modales. Ventana de tiempo de las series originales, desde 20/nov/2016 hasta 26/nov/2016.**



**Figura 3.55: Muro tipo I, variación diaria de las frec. modales. Ventana de tiempo de las series originales, desde 25/nov/2016 hasta 01/dic/2016.**

### 3.4.4. Registro Propiedades Modales – Muro tipo II

El muro cuenta con 2 acelerómetros uniaxiales instalados en su superficie. Al igual que en el muro I, los acelerómetros de este muro registran el proceso de secado y endurecimiento del sistema. Los registros de frecuencia modal fueron obtenidos mediante el método SSI-Data (Data-Driven Stochastic Subspace Identification) (Milton 2017).

En la Figura 3.56 se muestran el registro de las frecuencias modales del muro. Se cuentan con datos desde el 24 de septiembre del 2016 hasta el 31 de mayo del 2017. La frecuencia de muestreo de los datos es tal que se reporta un nuevo dato cada 60 minutos. En la Tabla 3.7 se muestra información de cuantos datos vacíos presenta cada frecuencia de vibrar.

Se tiene que las primeras 2 frecuencias modales presentan bajos porcentajes de data vacía, mientras que la tercera y cuarta presentan niveles medios de data vacía. Se observan cuatro intervalos menores de vacíos presentes en todas las frecuencias modales. Para efectos de esta memoria, se trabajará y analizarán las 3 primeras frecuencias modales del muro tipo II (Figura 3.57), dado que son las frecuencias que presentan menores porcentajes de datos vacíos.

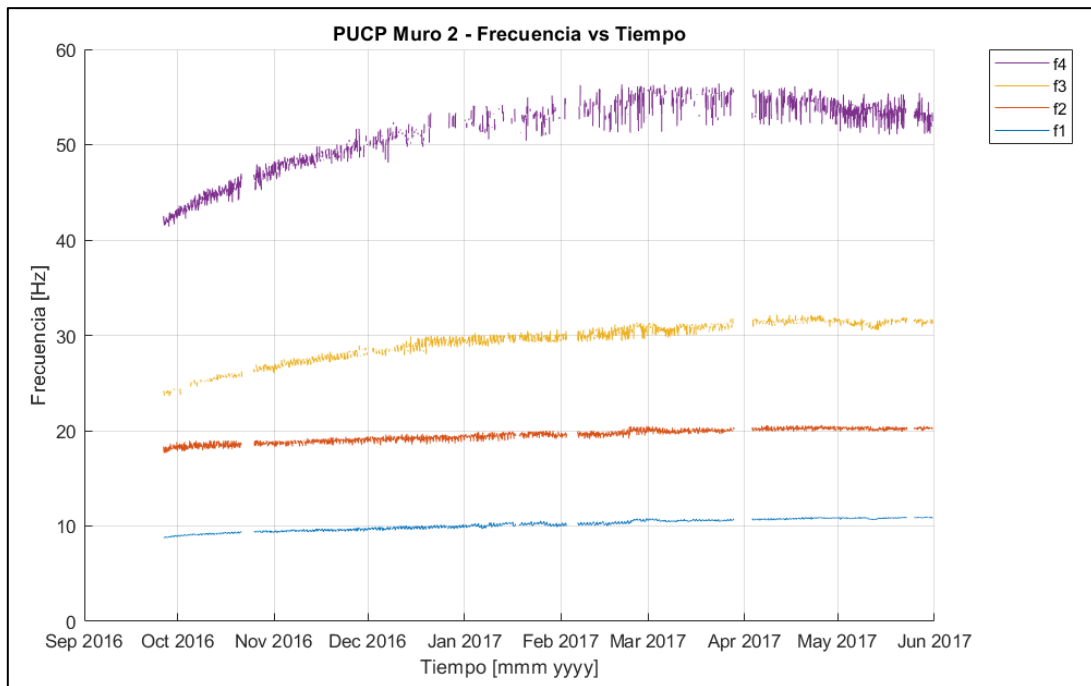


Figura 3.56: Muro tipo II, registro frecuencias modales.

Tabla 3.7: Muro tipo II, información de número de datos vacíos para cada frec. modal.

Frecuencia Modal [-]	N° de datos del registro [-]	N° de datos vacíos [-]	Porcentaje de datos vacíos [%]
1	5986	566	9.5
2	5986	971	16.2
3	5986	2492	41.6
4	5986	3178	53.1

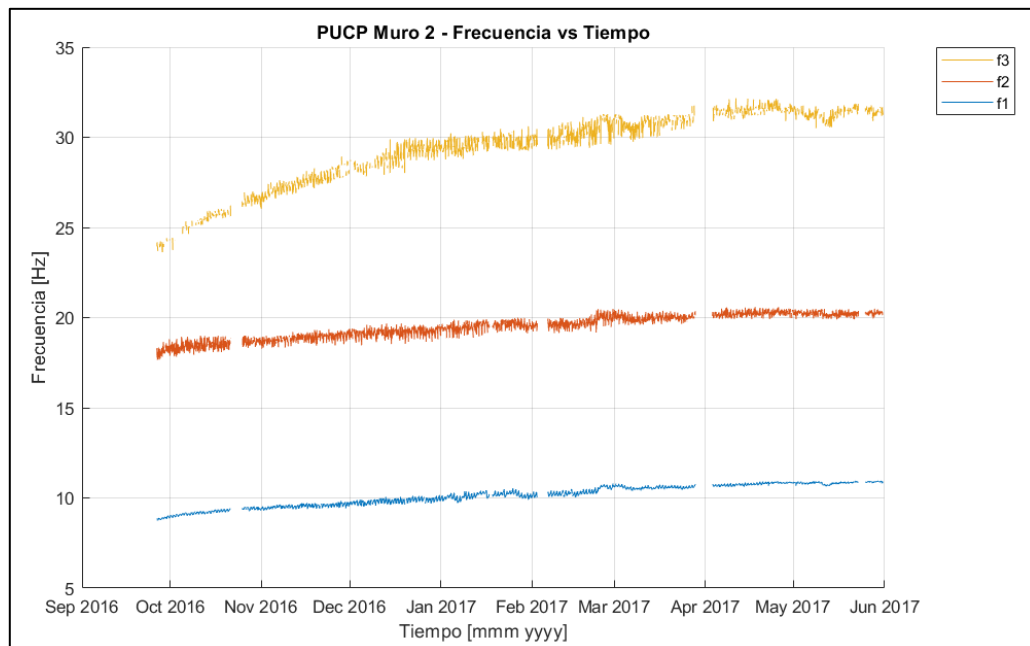
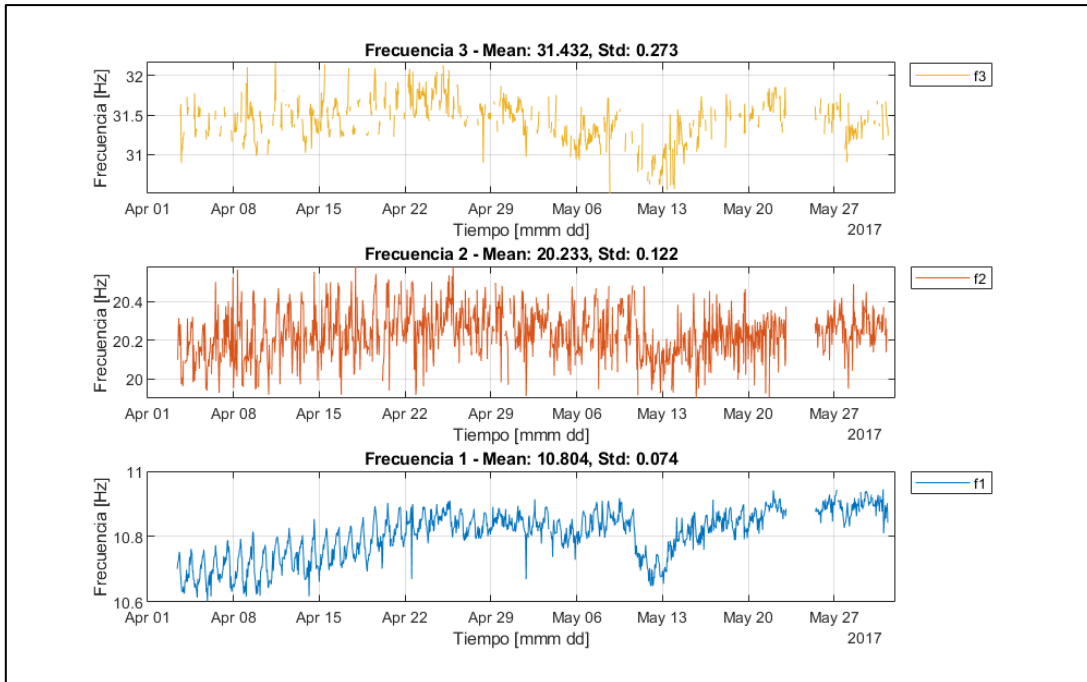


Figura 3.57: Muro tipo II, frecuencias modales a analizar.

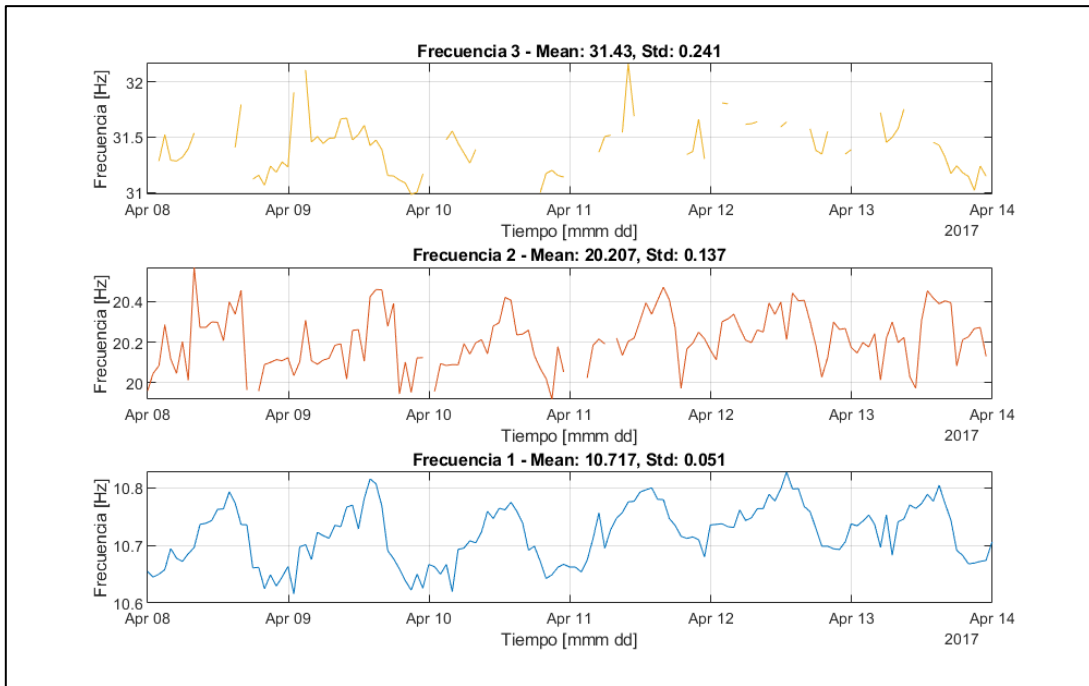
En la Figura 3.57 se observa el proceso de endurecimiento del muro, el cual está presente en todas las frecuencias modales. En la Figura 3.58 se hace un acercamiento al final del registro, donde las frecuencias modales se encuentran mayormente estabilizadas. En esta figura se observa una baja en la magnitud de todas las frecuencias modales, la cual ocurre a mitad de mayo de 2017. Estos cambios pueden estar vinculados a variaciones de humedad absoluta, dado que existe una baja de humedad absoluta a mediados de mayo del 2017 que coincide con las bajas en las frecuencias modales.



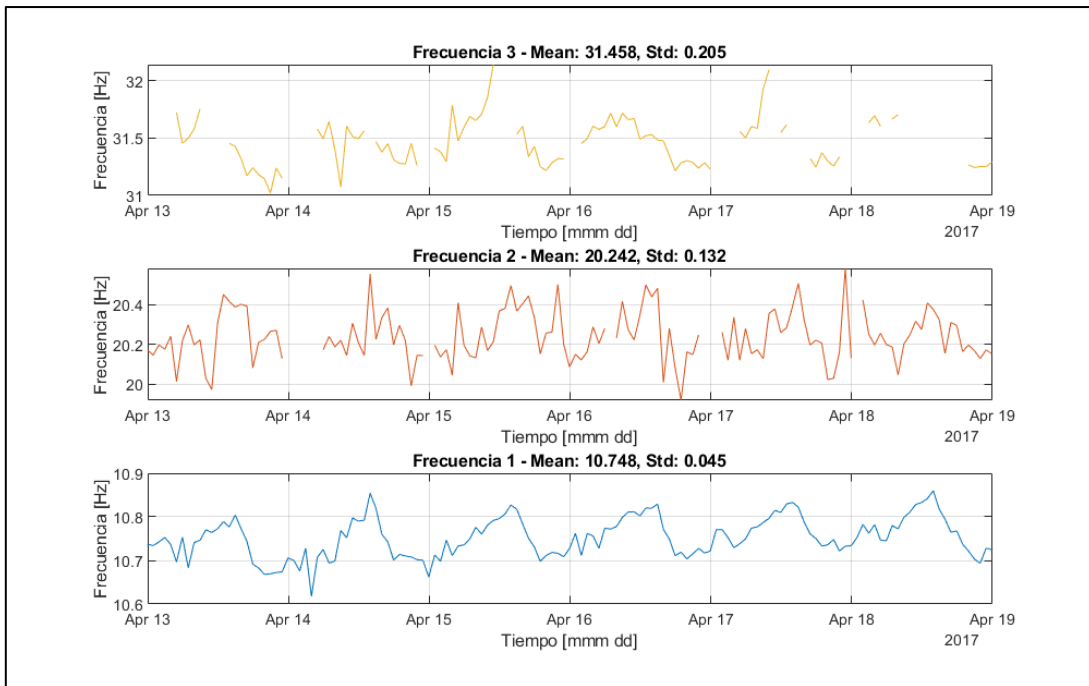
**Figura 3.58: Muro tipo II, frecuencias modales a analizar. Ventana de tiempo de las series originales, desde 01/apr/2017 hasta 01/jun/2017.**

Debido a la presencia del proceso de endurecimiento en la data modal, no se realizará la comparación estacional en el caso de los muros, dado que se cuenta únicamente con 3-4 meses de data modal pasada el proceso de endurecimiento, la que no es data suficiente para poder identificar la variación estacional en los registros.

Por otro lado, de la Figura 3.59 a la Figura 3.60 se muestra un acercamiento diario a la data de las 3 primeras frecuencias modales, donde se observa la variación diaria que presentan los registros. Se tiene que la magnitud de oscilación del ciclo diario no necesariamente es igual entre frecuencias modales. Tampoco es directo asegurar que la variación diaria presente exactamente la misma fase entre frecuencias modales.



**Figura 3.59: Muro tipo II, variación diaria de las frec. modales. Ventana de tiempo de las series originales, desde 08/apr/2017 hasta 14/jun/2017.**



**Figura 3.60: Muro tipo II, variación diaria de las frec. modales. Ventana de tiempo de las series originales, desde 13/apr/2017 hasta 19/jun/2017.**

### 3.4.5. Registro Propiedades Modales – Muro tipo III

El muro cuenta con 3 acelerómetros uniaxiales instalados en su superficie. Al igual que en el muro I, los acelerómetros de este muro registran el proceso de secado y endurecimiento del sistema. Los registros de frecuencia modal fueron obtenidos mediante el método SSI-Data (Data-Driven Stochastic Subspace Identification) (Milton 2017).

En la Figura 3.61 se muestran el registro de las frecuencias modales del muro. Se cuentan con datos desde el 21 de septiembre del 2016 hasta el 31 de mayo del 2017. La frecuencia de muestreo de los datos es tal que se reporta un nuevo dato cada 60 minutos. En la Tabla 3.8 se muestra información de cuantos datos vacíos presenta cada frecuencia de vibrar.

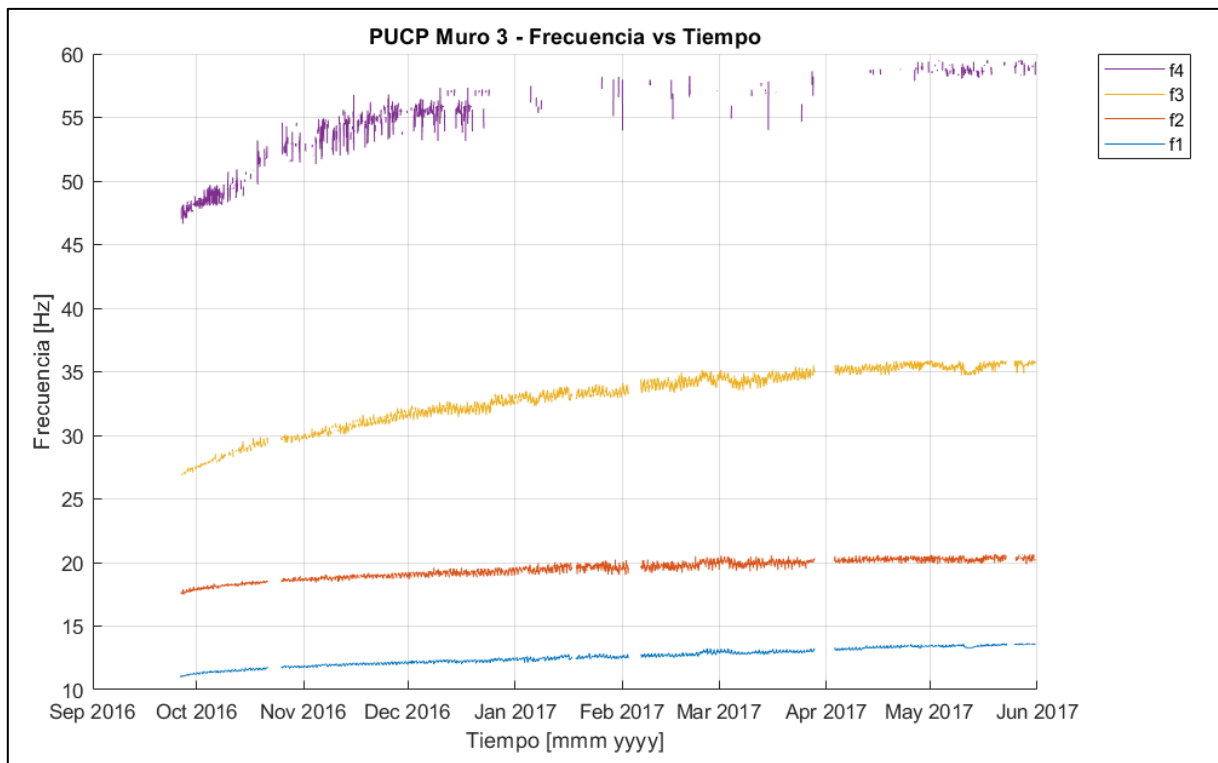


Figura 3.61: Muro tipo III, registro frecuencias modales.

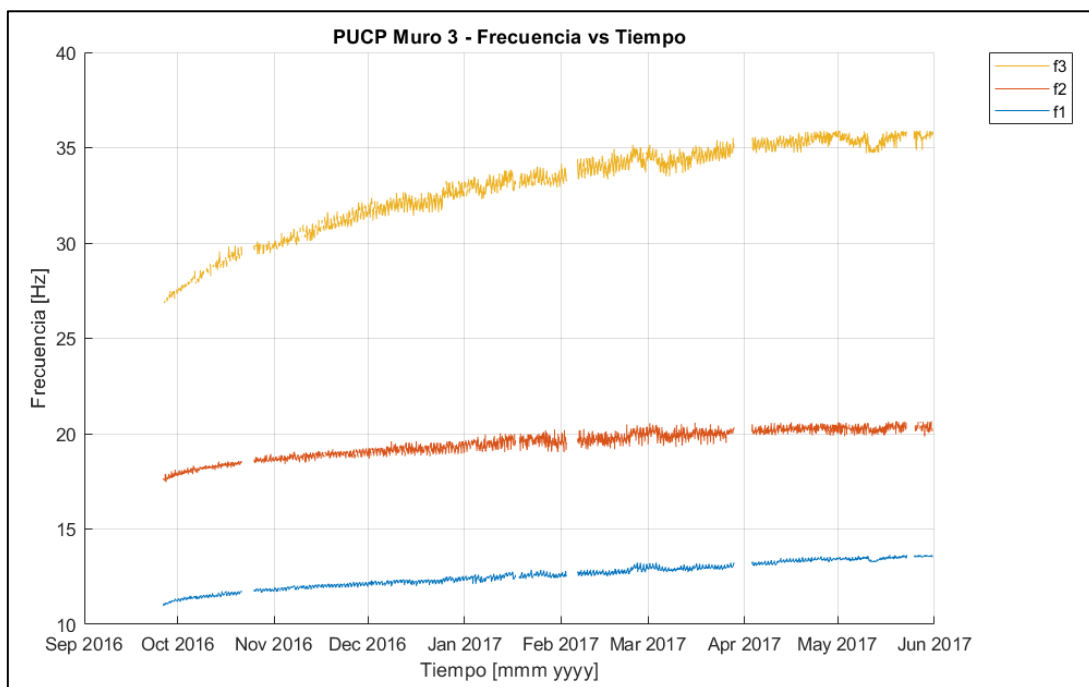
Tabla 3.8: Muro tipo III, información de número de datos vacíos para cada frec. modal.

Frecuencia Modal [-]	N° de datos del registro [-]	N° de datos vacíos [-]	Porcentaje de datos vacíos [%]
1	5987	507	8.5
2	5987	791	13.2
3	5987	1149	19.2
4	5987	4536	75.8



Para las 3 primeras frecuencias modales, se tiene un bajo porcentaje de data vacía (menor a 20%), mientras que para la cuarta frecuencia modal en adelante se observa un porcentaje de datos vacíos importante (sobre el 75%). Se observan tres intervalos de vacíos menores presentes en todas las frecuencias modales. Se tiene que a medida que la frecuencia de vibrar del modo es mayor, se observa que presenta mayor cantidad de valores vacíos en su data.

Para efectos de esta memoria, se trabajará y analizarán las 3 primeras frecuencias modales del muro tipo III (Figura 3.62), dado que son las frecuencias que presentan los menores porcentajes de datos vacíos.



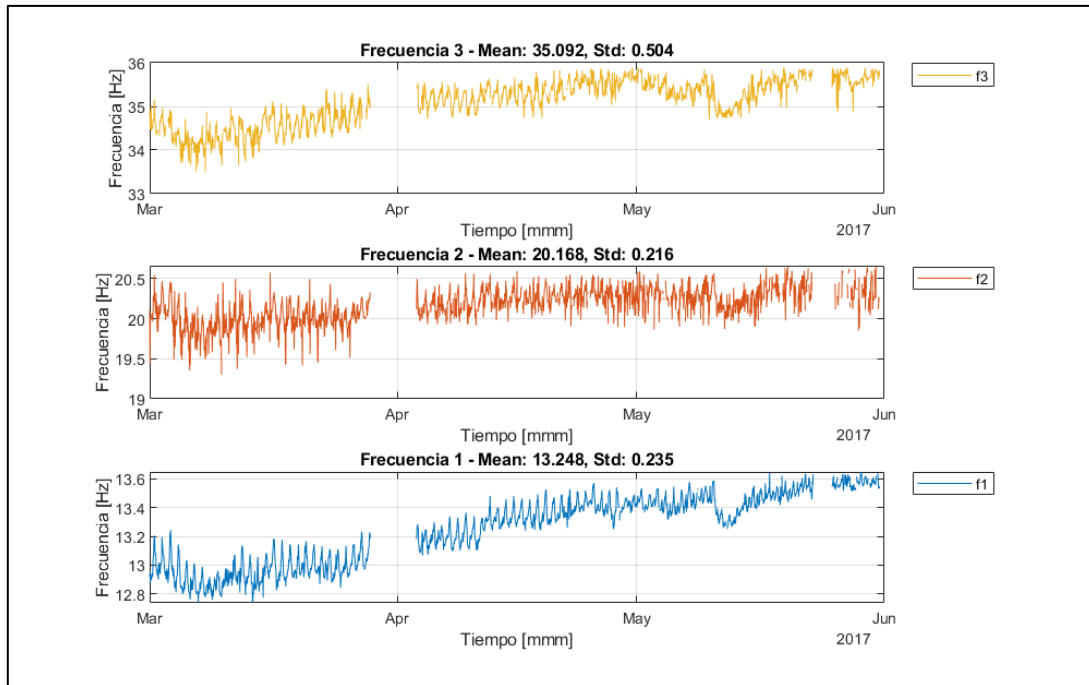
**Figura 3.62: Muro tipo III, frecuencias modales a analizar.**

En la Figura 3.62 se observa el proceso de endurecimiento del muro, el cual está presente en todas las frecuencias modales. En la Figura 3.63 se hace un acercamiento al final del registro, donde las frecuencias modales se encuentran mayormente estabilizadas. Al igual que el caso del Muro Tipo II, en esta figura se observa una baja en la magnitud de todas las frecuencias modales, la cual ocurre a mitad de mayo de 2017. Estos cambios pueden estar vinculados a variaciones de humedad absoluta, dado que existe una baja de humedad absoluta a mediados de mayo del 2017 que coincide con las bajas en las frecuencias modales.

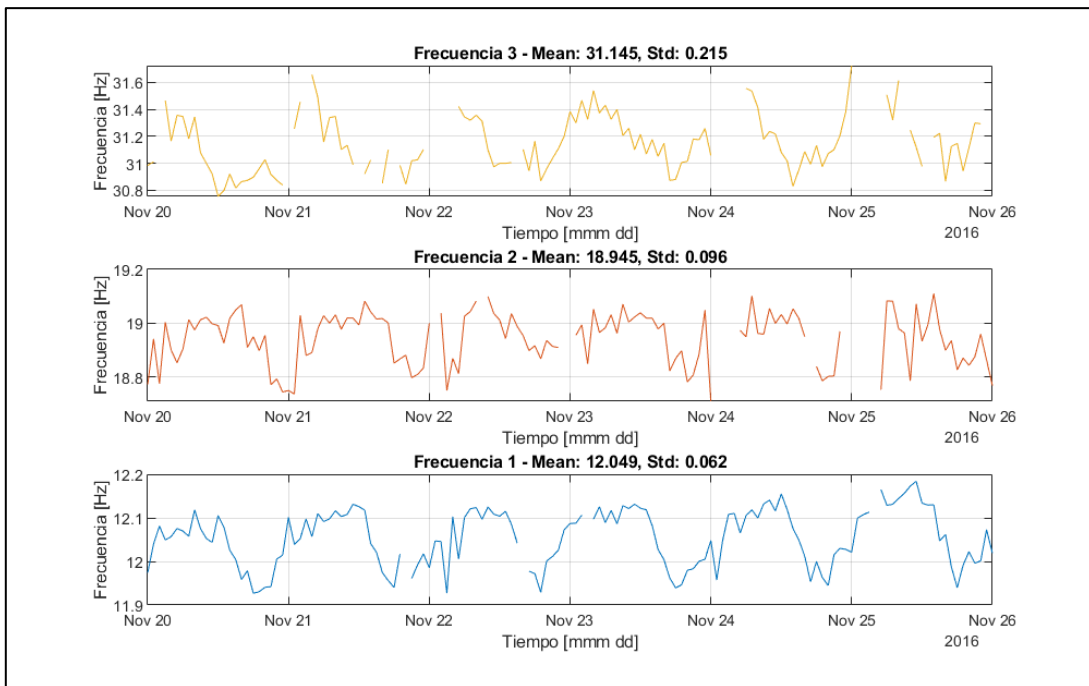
Debido a la presencia del proceso de endurecimiento en la data modal, no se realizará la comparación estacional en el caso de los muros, dado que se cuenta

únicamente con 2-3 meses de data modal pasada el proceso de endurecimiento, la que no es data suficiente para poder identificar la variación estacional en los registros.

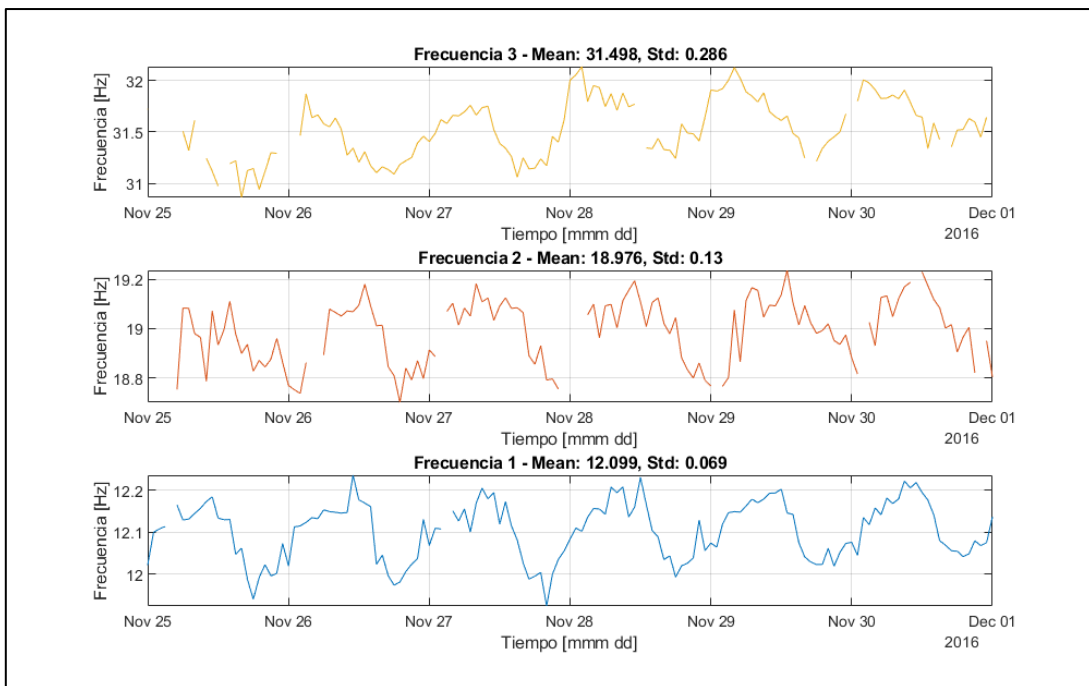
Por otro lado, de la Figura 3.64 a la Figura 3.65 se muestra un acercamiento diario a la data de las 3 primeras frecuencias modales, donde se observa la variación diaria que presentan los registros. Se tiene que la magnitud de oscilación del ciclo diario no necesariamente es igual entre frecuencias modales. Tampoco es directo asegurar que la variación diaria presente exactamente la misma fase entre frecuencias modales.



**Figura 3.63: Muro tipo III, frecuencias modales a analizar. Ventana de tiempo de las series originales, desde 01/mar/2017 hasta 01/jun/2017.**



**Figura 3.64: Muro tipo III, variación diaria de las frec. modales. Ventana de tiempo de las series originales, desde 20/nov/2016 hasta 26/nov/2016.**



**Figura 3.65: Muro tipo III, variación diaria de las frec. modales. Ventana de tiempo de las series originales, desde 25/nov/2016 hasta 01/dic/2016.**

## Capítulo 4 : FILTRADO DE COMPONENTES

### 4.1 Filtrado Aplicado a Data Experimental

En esta sección se explicará cuáles son los pasos previos que se deben considerar al momento de generar un filtrado de componentes a una señal experimental. Para el caso de esta memoria, estas señales experimentales corresponderán a los registros de los parámetros ambientales y a los registros de frecuencia modal de la estructura.

#### 4.1.1. Procesamiento Previo

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo 3, se observan, tanto en la data ambiental como en la data modal, ciclos de variación de largo y de corto plazo, los cuales se denominaron ciclos estacionales y ciclos diarios respectivamente. Este hecho se puede comprobar si se aplica la transformada de Fourier sobre los datos, donde la transformada identificará las frecuencias constituyentes de la señal (ciclo diario y estacional). Sin embargo, antes de poder aplicar la transformada de Fourier, es necesario hacer un procesamiento previo a cada señal. Esto con el fin de que la transformada de Fourier se aplique correctamente sobre los datos. El procedimiento se detalla a continuación.

Antes que nada, se debe tener certeza que los datos de la señal a procesar cuenten con una frecuencia de muestreo constante y consistente en el tiempo. En el caso que falten valores de datos en ciertas posiciones de la señal, estos deberán ser agregados en estas posiciones como valores nulos o valores vacíos. Puede ocurrir también el caso que la frecuencia de muestreo entre ciertos datos presente diferencias pequeñas (1% a 5%) a la frecuencia de muestreo nominal impuesta. Sin embargo, si esto ocurre de manera puntual y no consistentemente en la data, no tendrá afectos apreciables en los resultados y es posible omitir aquellas ocurrencias.

En el caso que se cuente con registros que presentan vacíos intermedios o valores nulos en la data, se ha optado interpolar estos valores faltantes para llenar este vacío en la data. Esto es porque el algoritmo de la transformada de Fourier discreta no funciona si existen vacíos de datos en partes del registro. Ahora, para asignar un valor a estos vacíos de data, es necesario elegir un tipo de interpolación (lineal, tipo spline, tipo PCHIP, etc.). Este paso es importante, dado que la forma en que se interpole si afectará a cómo será el resultado de la transformada de Fourier, y por ende, es de esperar que también afecte al resultado del filtrado de componentes. Sin embargo, una vez realizado el filtrado de componentes, si se compara el resultado producido por cada tipo de interpolación, y en particular, al comparar una misma componente filtrada para distintos tipos de interpolación, se observa que las distintas opciones de interpolación tienden al mismo resultado final, existiendo mínima variación entre los efectos que cada tipo de

interpolación produce sobre la calidad del filtrado. Este hecho se mantendrá cierto si la interpolación realizada es coherente con el resto de la data, es decir, que siga medianamente la tendencia de la data, sin asignar accidentalmente valores que se desvíen de la data por varios ordenes de magnitud. Adicionalmente, como se explicará un poco más adelante, estos valores de interpolación serán desechados una vez que se obtengan las distintas componentes filtradas de la señal, volviendo a generar valores nulos en la data donde originalmente existían. Dado que la interpolación de datos solo es necesaria para obtener las diferentes componentes filtradas, una vez conseguidas, no hay problema en eliminar estos datos interpolados a la data. Esto logra preservar la calidad de la data original, sin agregar valores ajenos a los que fueron originalmente medidos. En resumen, se concluye que, para elegir la interpolación a realizar a la data, se puede elegir cualquiera que siga la tendencia de la señal y que no agregue valores que se desvíen por varios ordenes de magnitud de la tendencia observada.

Para efectos del desarrollo de esta memoria, al momento de procesar los distintos tipos de data (ambiental o modal), se verificó cada tipo de interpolación para cada registro individual de data, asegurándose de encontrar el tipo interpolación que mejor se adecuara al registro y que cumpla de mejor manera los requisitos nombrados en el párrafo anterior.

Ahora, es necesario aclarar que el porcentaje de valores nulos en la data afecta la calidad del filtrado de componentes. Dado que en estos casos es necesario generar una interpolación para llenar temporalmente los vacíos, si el porcentaje de vacíos es muy alto (40% a 50%), el algoritmo de interpolación va a generar un interpolado de mala calidad (respecto a la tendencia esperada del parámetro). Dado que el proceso de filtrado tendrá que trabajar sobre una señal que presenta bajo porcentaje de datos originalmente medidos, este no cuenta con la suficiente información para poder realizar un filtrado fiel a la señal original. La mayor diferencia se presentará cuando se intente reconstruir la señal original a partir de la suma de las componentes filtradas, donde se tendrá que la suma de los datos filtrados falla en replicar la magnitud de la señal original consistentemente. Por lo tanto, en resumen, una mayor cantidad de vacíos en la data implicará una disminución en la calidad del filtrado. De la misma manera, a menor cantidad de valores nulos en la data, mayor calidad de señal se obtendrá al filtrar la data.

Finalmente, una vez que se hayan comprobado los puntos descritos anteriormente, se procede a quitar la tendencia lineal de la data. Esto significa sumar o restar un valor constante a toda la data para hacer que el promedio de todos los datos sea cero. Alternativamente, se puede interpretar este hecho como modificar la data para oscile en torno a amplitud cero, en vez de oscilar en un punto de amplitud no nulo. Este paso se realiza únicamente para lograr que la transformada de Fourier de la data presente un valor de amplitud nulo a frecuencia cero, haciendo más fácil la identificación de frecuencias cercanas a cero, pero no nulas.

Una vez completado cada punto del procesamiento previo, se cuenta con los datos preparados para poder aplicar la transformada de Fourier correctamente.

### **4.1.2. Aplicación de la Transformada de Fourier**

Ya aplicado el procesamiento previo explicado en 4.1.1 a la data, es directa la aplicación de la transformada de Fourier discreta a la data experimental. Una vez aplicada, permitirá identificar las distintas frecuencias de vibrar de cada frecuencia constituyente de la señal.

Ahora, es posible que la señal procesada presente múltiples frecuencias constituyentes, por lo que se debe elegir si se quiere obtener cada una de estas componentes, o si se quiere un grupo específico de estas componentes. Una vez decidido, se debe registrar cada uno de los valores de frecuencia de vibrar de las componentes de interés, dado que se utilizarán para filtrar cada componente de interés de la señal.

### **4.1.3. Proceso de Filtrado de Componentes**

Para efectos de filtrar componentes de la data modal y ambiental, el proceso es tal como se indica en la sección 2.5. Sin embargo, al momento de determinar el rango de frecuencias que se aplicará para cada filtrado de componente, se aseguró de usar un rango de frecuencias lo más amplio posible sin que intercepte a los rangos de frecuencias de componentes adyacentes. Se tomó esta decisión de manera de extraer la mayor cantidad posible de información y comportamiento de la data.

## **4.2 Torre Central**

### **4.2.1. Temperatura Ambiental**

En la Figura 4.1 se muestra la transformada de Fourier de la señal de temperatura ambiental (registrada a las afueras del edificio), así como se muestra la señal previamente procesada para una correcta aplicación de la transformada de Fourier, tal como se indicó en la sección 4.1. Este procesamiento previo se resume en: a) Asegurar una tasa de muestreo constante del registro; b) Interpolación de datos vacíos en el registro; y c) Remover la tendencia lineal de la data. Se muestra un acercamiento de la transformada de Fourier en la Figura 4.2. Al aplicar la transformada de Fourier a la señal, no solo se identifica una componente anual y diaria (24 horas), sino que también se identifican múltiples subcomponentes correspondientes a 12.0 hrs, 8.0 hrs, 6.0 hrs, 4.8 hrs, etc. Estas presentan la forma  $(24/n)$  hrs y tienden a disminuir su amplitud a mayor frecuencia (ver Figura 4.2). Dado que presentan una amplitud no despreciable en la transformada de Fourier, se considerará un número de estas subcomponentes en el filtrado de componentes. En la Tabla 4.1 se detallan los 6 primeros valores de frecuencia identificados, y su periodo correspondiente. Estos valores también se marcan de la Figura 4.1 a la Figura 4.2.

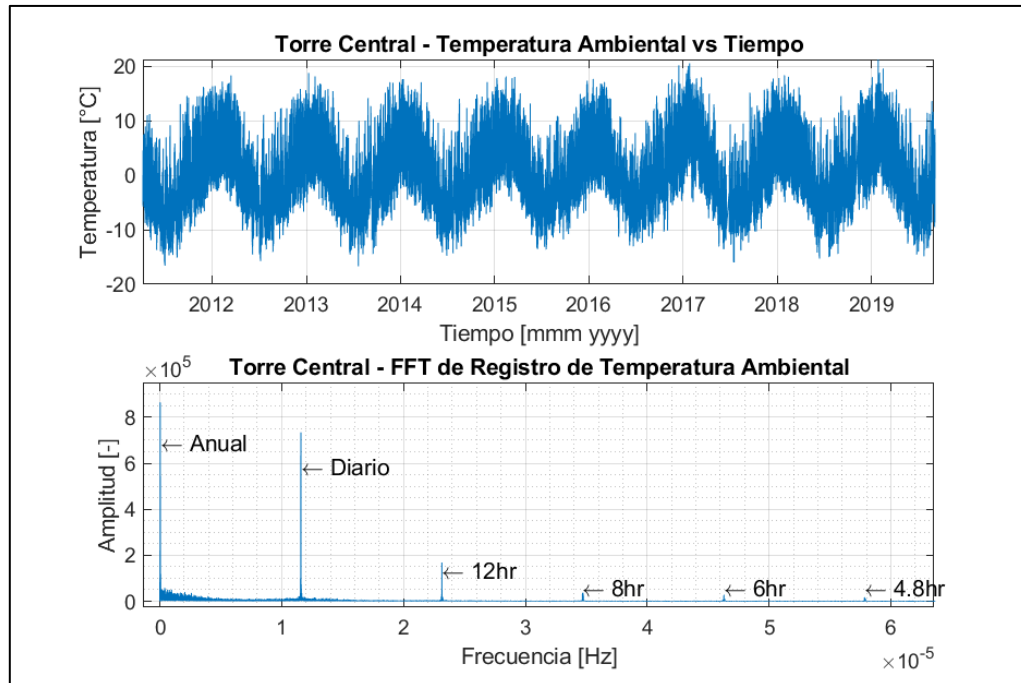


Figura 4.1: Torre Central, temperatura ambiental. Superior: señal procesada previa aplicación de transformada de Fourier. Inferior: transformada de Fourier de la señal.

Tabla 4.1: Torre Central, temperatura ambiental, frecuencias identificadas.

Frecuencia identificada	1	2	3	4	5	6
Frecuencia [Hz]	3.111e-8	1.1574e-5	2.3148e-5	3.4690e-5	4.630e-5	5.7839e-5
Periodo [-]	1.019 años	24 horas	12 horas	8 horas	6 horas	4,8 horas

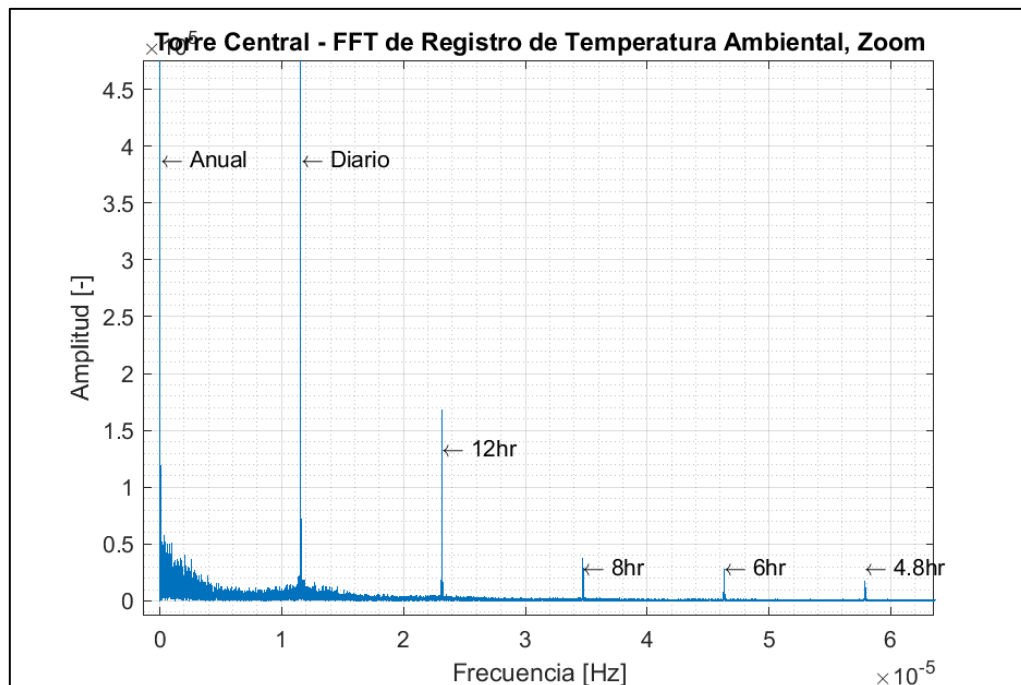
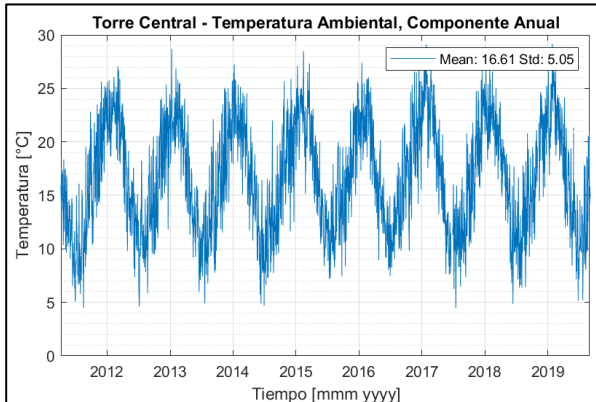
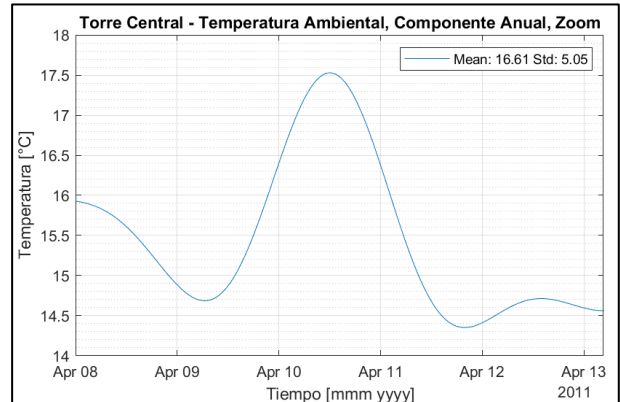


Figura 4.2: Torre Central, temperatura ambiental. Acercamiento a la transformada de Fourier.

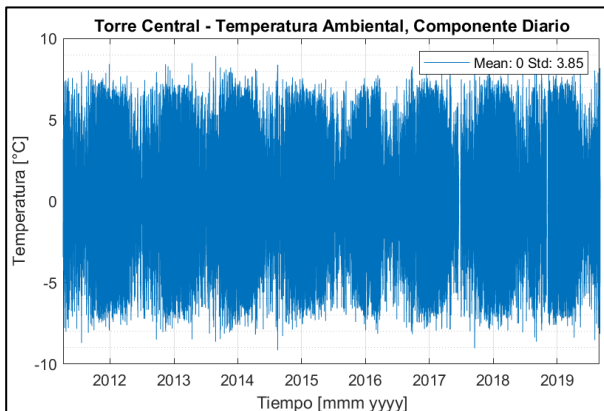
Luego, se procede a filtrar las primeras 6 componentes (indicadas en la Tabla 4.1). Los resultados de las primeras 3 componentes se muestran para la Figura 4.3 a la Figura 4.8, donde se muestra tanto un acercamiento completo como un acercamiento diario. Las componentes restantes se muestran en la sección A.4.1 de los anexos.



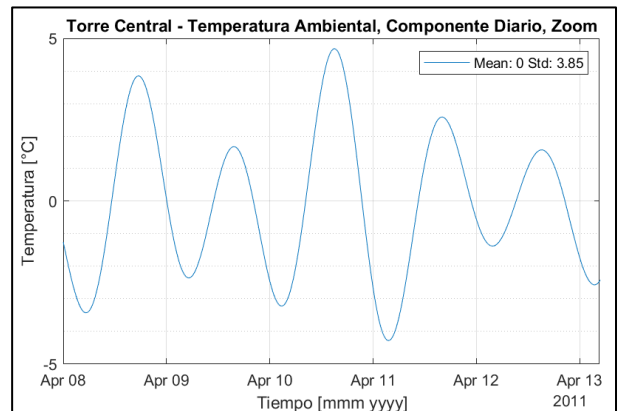
**Figura 4.3: Torre Central, temperatura, Comp. Anual.**



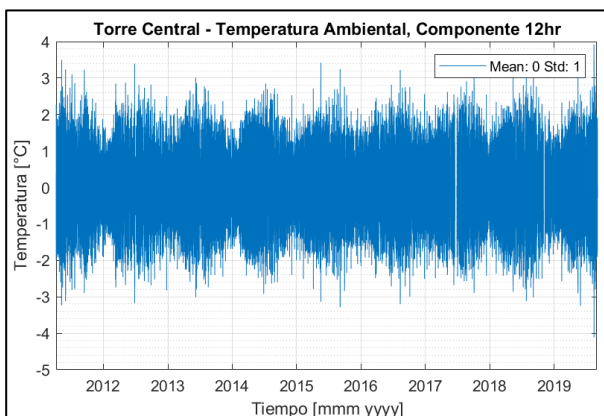
**Figura 4.4: Torre Central, temperatura, Comp. Anual. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**



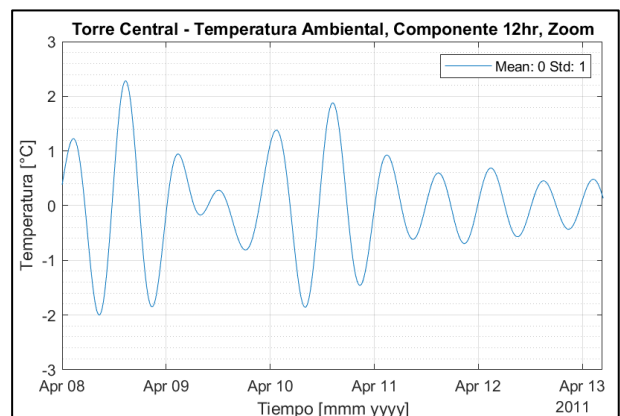
**Figura 4.5: Torre Central, temperatura, Comp. 24 hrs.**



**Figura 4.6: Torre Central, temperatura, Comp. 24 hrs. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**



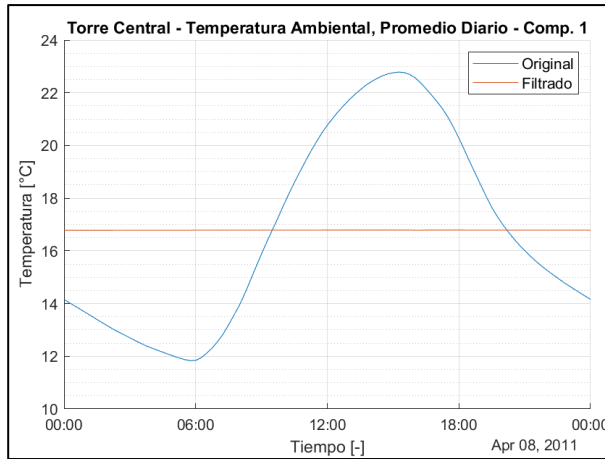
**Figura 4.7: Torre Central, temperatura, Comp. 12 hrs.**



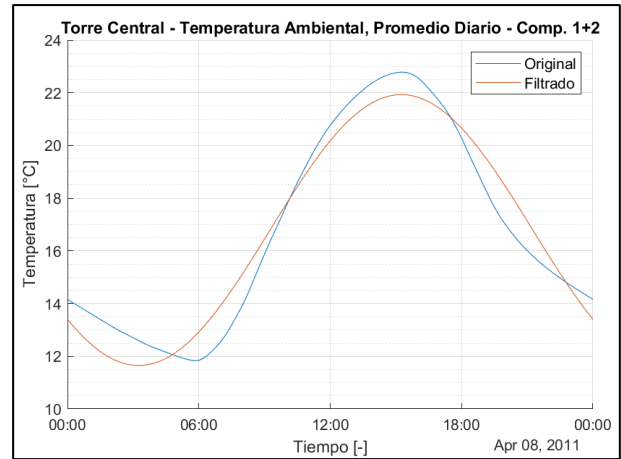
**Figura 4.8: Torre Central, temperatura, Comp. 12 hrs. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**



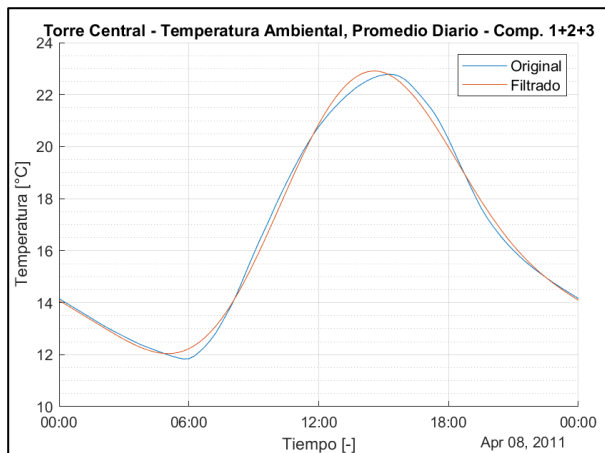
Del resultado del filtrado de componentes, se concluye que la componente anual (Figura 4.3) corresponde al ciclo estacional de la data, debido a que corresponde a un periodo de 1 año. Dado esto, se considerará que el resto de las componentes corresponden al ciclo diario de la data. Ahora, para identificar cuantas de estas componentes es necesario considerar para replicar el ciclo diario, se calculará el ciclo diario promedio (explicado en la sección 2.1) para distintas sumas acumuladas de estas componentes. Esto se muestra de la Figura 4.9 a la Figura 4.12.



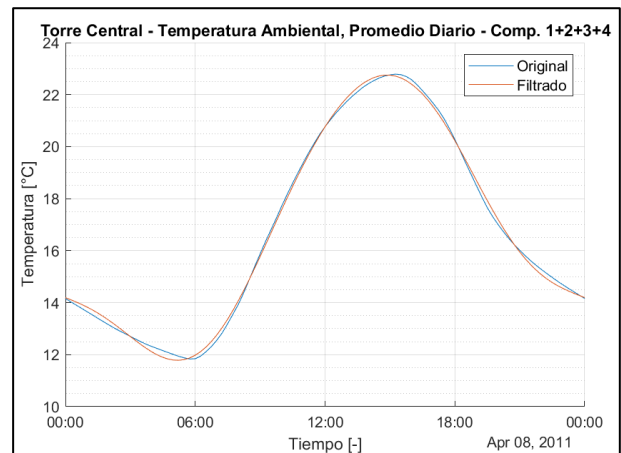
**Figura 4.9: Torre Central, promedio diario de temperatura. Comp. Anual.**



**Figura 4.10: Torre Central, promedio diario de temperatura. Comp. Anual+24hrs.**



**Figura 4.11: Torre Central, promedio diario de temperatura. Comp. Anual+24hrs+12hrs.**

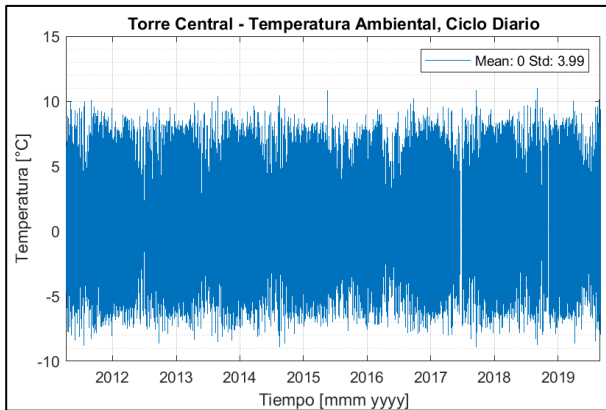


**Figura 4.12: Torre Central, promedio diario de temperatura. Comp. Anual+24hrs+12hrs+8hrs.**

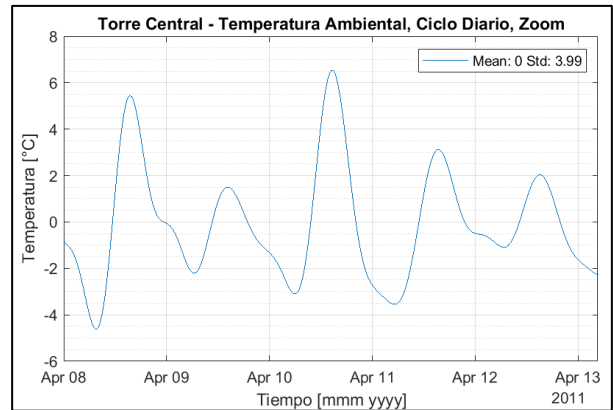
De los resultados de la Figura 4.9 a la Figura 4.12, se decide considerar la componente diaria del registro como la suma de las componentes de 24hrs y 12 hrs, puesto que esta suma acumulada refleja satisfactoriamente el promedio diario del registro original, y porque la inclusión de la siguiente componente a la suma acumulada no presenta cambios significativos en el promedio diario. Este resultado es importante, el cual indica que para obtener el ciclo diario de la data no basta con incluir la componente

de frecuencias de 24 hrs, sino que hay que incluir un número de subcomponentes sucesivas junto a esta.

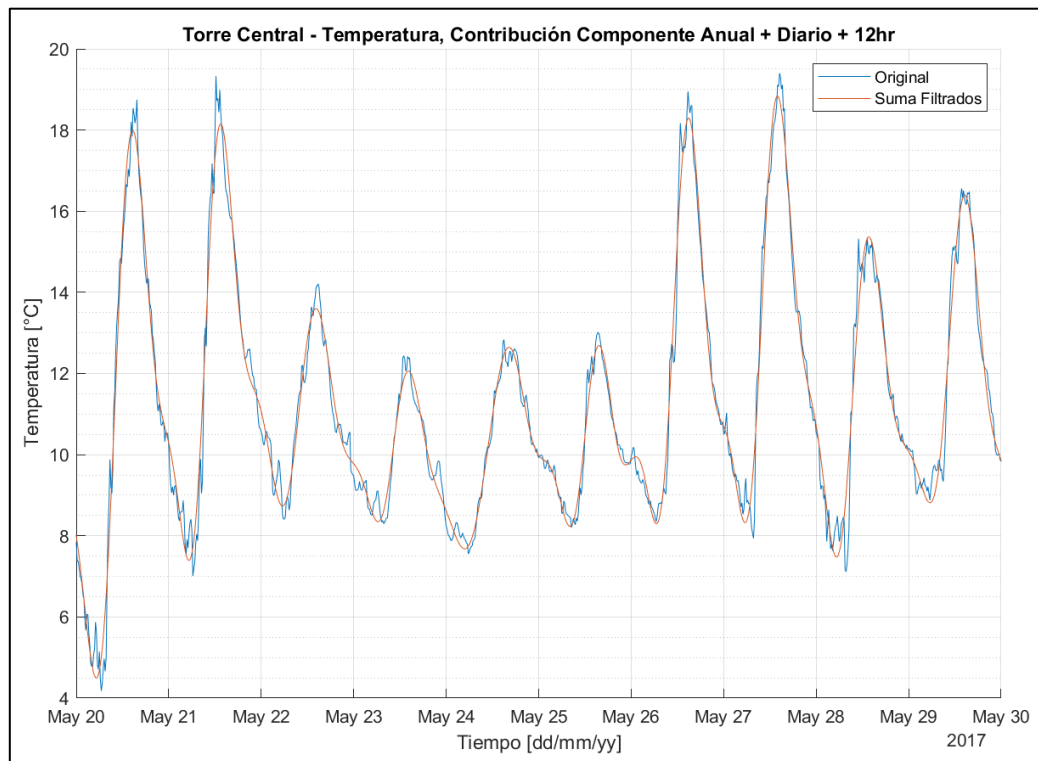
De la Figura 4.13 a la Figura 4.14 se muestra el resultado de la componente diaria. En la Figura 4.15 se ve la componente estacional y diaria sumadas, graficadas junto a la data original. De esta figura se observa que el filtrado de componentes es satisfactorio: al sumar la componente estacional y diaria se reconstruye la señal original, manteniendo la calidad de esta. Se observa que la señal filtrada presenta un suavizado respecto a la señal original.



**Figura 4.13: Torre Central, temperatura, Ciclo Diario.**



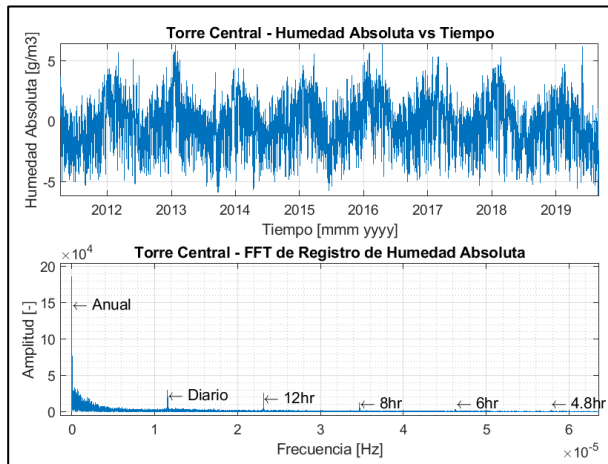
**Figura 4.14: Torre Central, temperatura, Ciclo Diario. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**



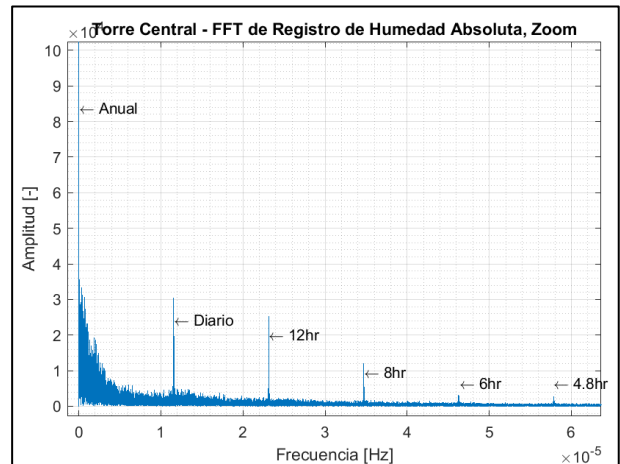
**Figura 4.15: Torre Central, temperatura, comparación señal original vs filtrada. Ventana de tiempo desde 20/may/17 hasta 30/may/17.**

## 4.2.2. Humedad Absoluta

En la Figura 4.16 se muestra la transformada de Fourier del registro de humedad absoluta (mediciones respecto al exterior del edificio), así como se muestra la señal previamente procesada para una correcta aplicación de la transformada de Fourier. Este procesamiento previo se resume en: a) Asegurar una tasa de muestreo constante del registro; b) Interpolación de datos vacíos en el registro; y c) Remover la tendencia lineal de la data. Se muestra un acercamiento a la transformada de Fourier en la Figura 4.17. En la Tabla 4.2 se detallan los 6 primeros valores de frecuencia identificados, y su periodo correspondiente. Estos valores también se marcan de la Figura 4.16 a la Figura 4.17.



**Figura 4.16: Torre Central, humedad absoluta. Superior: señal procesada previa aplicación de transformada de Fourier. Inferior: transformada de Fourier de la señal.**

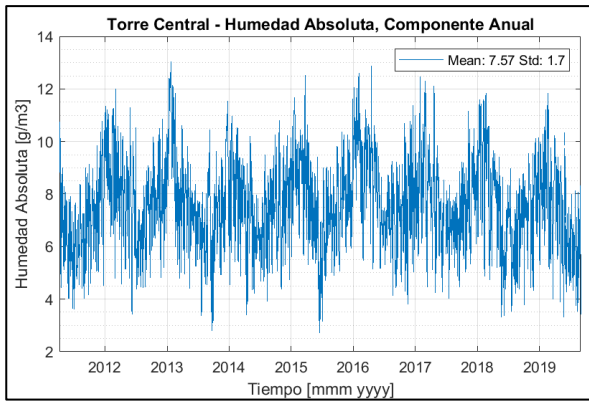


**Figura 4.17: Torre Central, humedad absoluta. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**

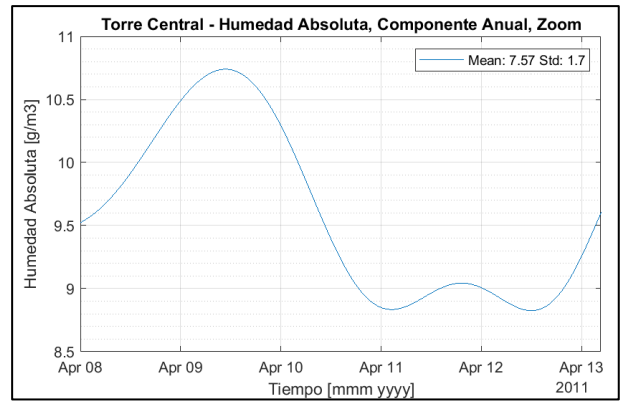
**Tabla 4.2: Torre Central, humedad absoluta, frecuencias identificadas.**

Frecuencia identificada	1	2	3	4	5	6
<b>Frecuencia [Hz]</b>	3.111e-8	1.157e-5	2.315e-5	3.472e-5	4.633e-5	5.784e-5
<b>Periodo [-]</b>	1.019 años	24 horas	12 horas	8 horas	6 horas	4,8 horas

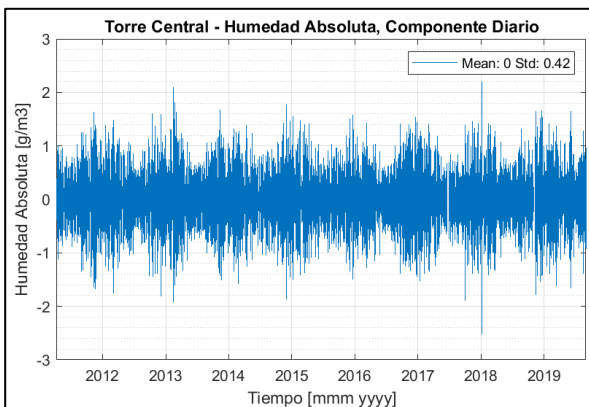
Luego, se procede a filtrar las primeras 6 componentes. Los resultados de las primeras 3 componentes se muestran de la Figura 4.18 a la Figura 4.23, donde se muestra tanto un acercamiento completo como un acercamiento diario. Las componentes restantes se muestran en la sección A.4.2 de los anexos.



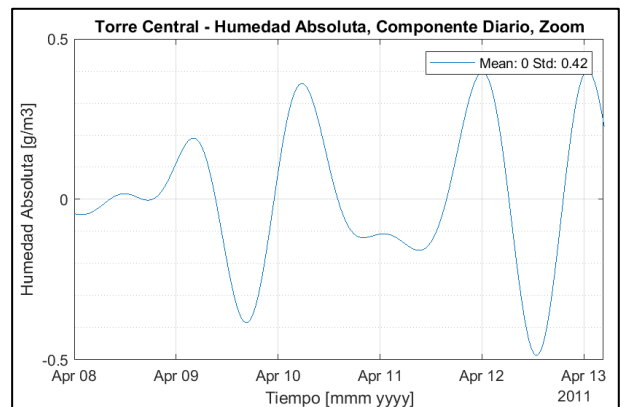
**Figura 4.18: Torre Central, Humedad Abs., Comp. Anual.**



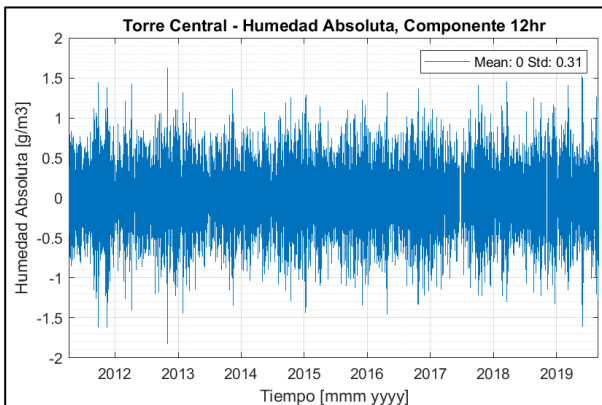
**Figura 4.19: Torre Central, Humedad Abs., Comp. Anual. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**



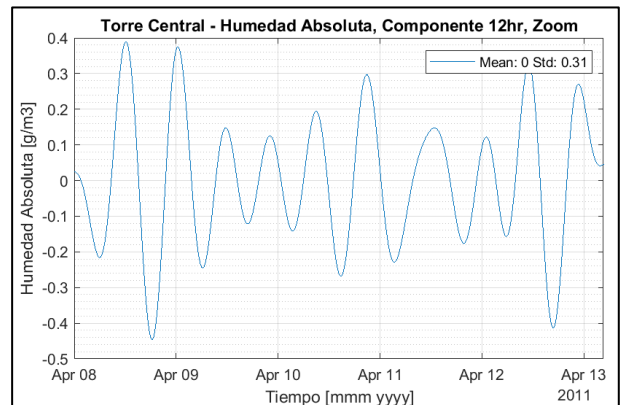
**Figura 4.20: Torre Central, Humedad Abs., Comp. 24 hrs.**



**Figura 4.21: Torre Central, Humedad Abs., Comp. 24 hrs. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**



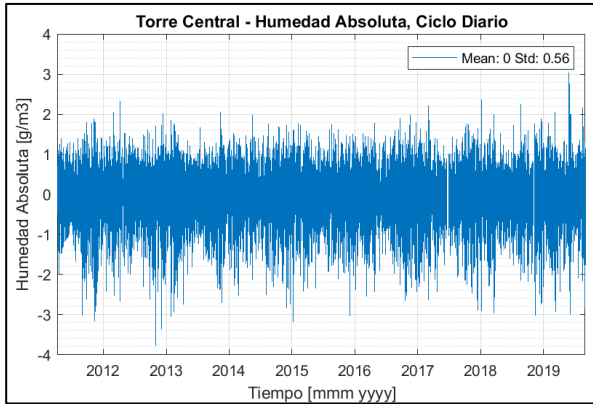
**Figura 4.22: Torre Central, Humedad Abs., Comp. 12 hrs.**



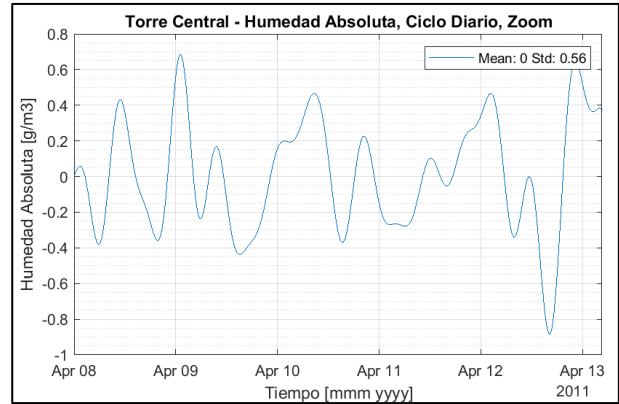
**Figura 4.23: Torre Central, Humedad Abs., Comp 12 hrs. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**

Para obtener la componente diaria de la data, se calcula el ciclo diario promedio para distintas sumas acumuladas de componentes, y se obtiene que la suma de las componentes de 24hrs, 12hrs y 8hrs reflejan el ciclo diario de la señal. De la Figura 4.24 a la Figura 4.25 se muestra el resultado de la componente diaria. Con respecto a la

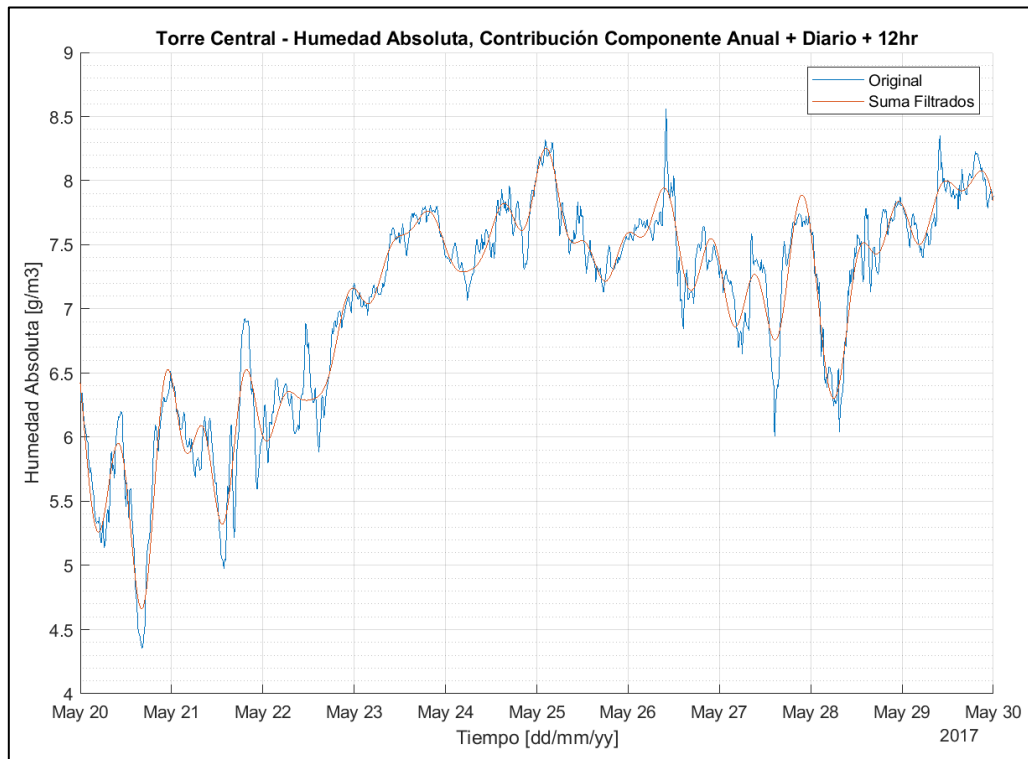
componente estacional de la data, se tiene que esta corresponde a la primera componente del filtrado (ciclo anual). Finalmente, en la Figura 4.26 se ve la componente estacional y diaria sumadas, graficadas junto a la data original. Se observa que el filtrado de componentes es satisfactorio.



**Figura 4.24: Torre Central, humedad abs., Ciclo Diario.**



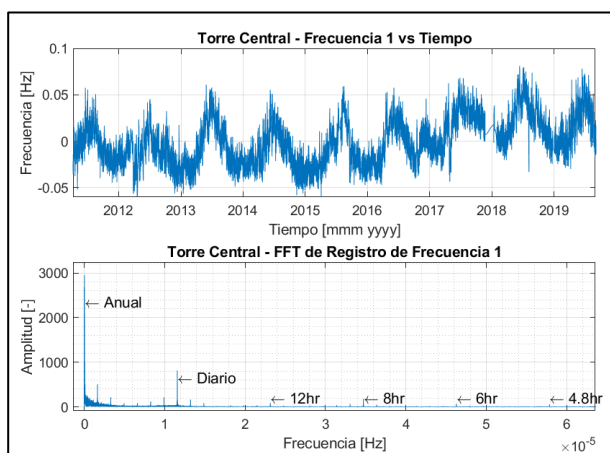
**Figura 4.25: Torre Central, humedad abs., Ciclo Diario. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**



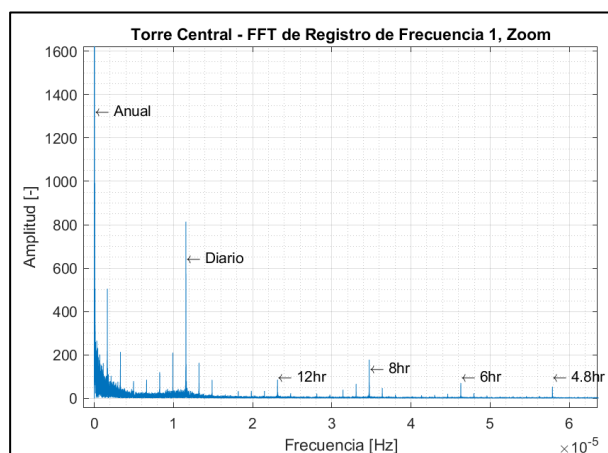
**Figura 4.26: Torre Central, humedad abs., comparación señal original vs filtrada. Ventana de tiempo desde 20/may/17 hasta 30/may/17.**

### 4.2.3. Frecuencia Modal 1

En la Figura 4.27 se muestra la transformada de Fourier de la frecuencia modal 1, así como se muestra la señal previamente procesada para una correcta aplicación de la transformada de Fourier. Este procesamiento previo se resume en: a) Asegurar una tasa de muestreo constante del registro; b) Interpolación de datos vacíos en el registro; y c) Remover la tendencia lineal de la data. Se muestra un acercamiento a la transformada de Fourier en la Figura 4.28. En la Tabla 4.3 se detallan los 6 primeros valores de frecuencia identificados, y su periodo correspondiente. Estos valores también se marcan en la Figura 4.27 a la Figura 4.28.



**Figura 4.27: Torre Central, frecuencia modal 1. Superior: señal procesada previa aplicación de transformada de Fourier. Inferior: transformada de Fourier de la señal.**

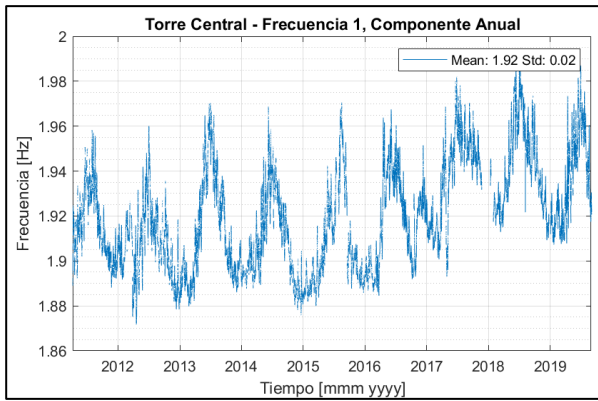


**Figura 4.28: Torre Central, frecuencia modal 1. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**

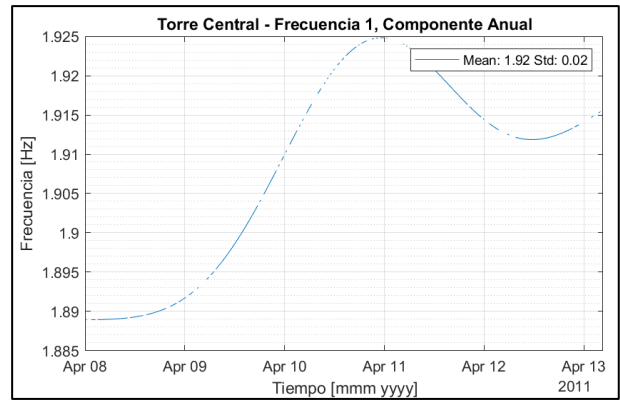
**Tabla 4.3: Torre Central, frecuencia modal 1, frecuencias identificadas.**

Frecuencia identificada	1	2	3	4	5	6
Frecuencia [Hz]	3.111e-8	1.157e-5	2.315e-5	3.472e-5	4.630e-5	5.787e-5
Periodo [-]	1.019 años	24 horas	12 horas	8 horas	6 horas	4,8 horas

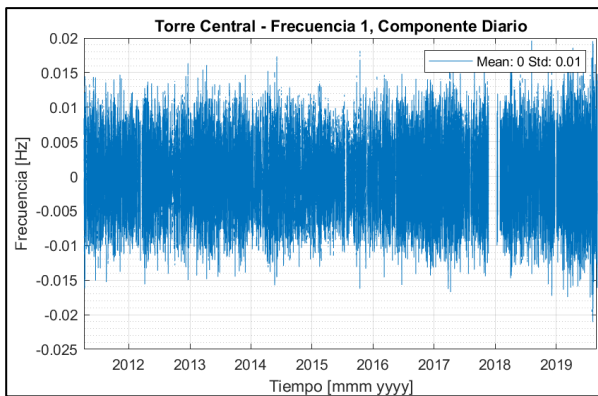
Se observa que en la transformada de Fourier se detectan múltiples máximos locales alrededor de las frecuencias de interés (indicadas en la Tabla 4.3), lo cuales fueron generados por la interpolación de los datos vacíos, por lo que se ignorarán. Se procede a filtrar las primeras 6 componentes (indicadas en la Tabla 4.3). Los resultados de las primeras 3 componentes se muestran en la Figura 4.29 a la Figura 4.34. Las componentes restantes se muestran en la sección A.4.3 de los anexos.



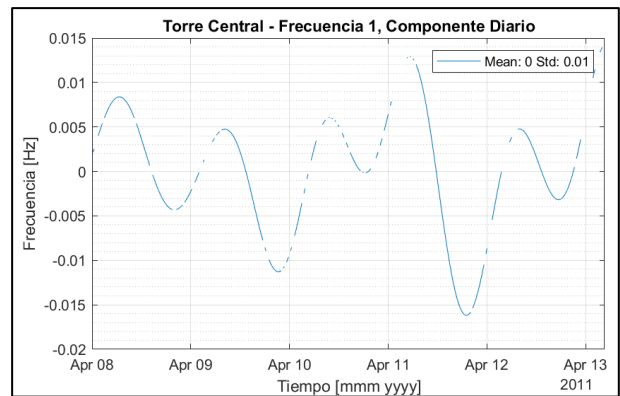
**Figura 4.29: Torre Central, freq. modal 1, Comp. Anual.**



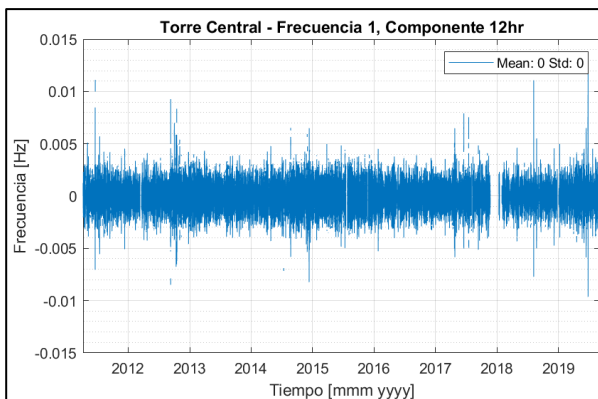
**Figura 4.30: Torre Central, freq. modal 1, Comp. Anual. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**



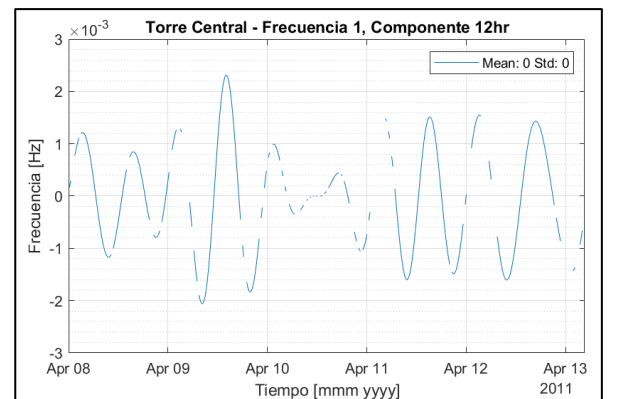
**Figura 4.31: Torre Central, freq. modal 1, Comp. 24 hrs.**



**Figura 4.32: Torre Central, freq. modal 1, Comp. 24 hrs. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**



**Figura 4.33: Torre Central, freq. modal 1, Comp. 12 hrs.**

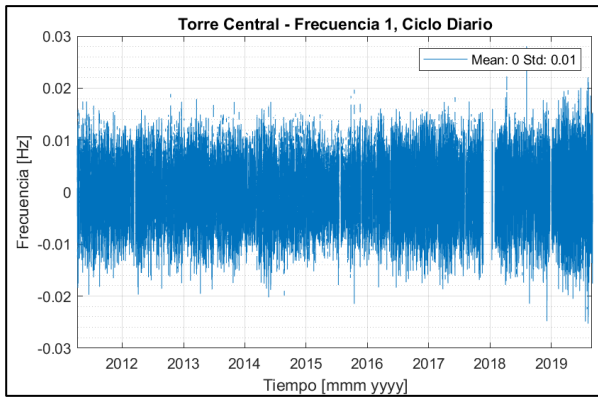


**Figura 4.34: Torre Central, freq. modal 1, Comp. 12 hrs. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**

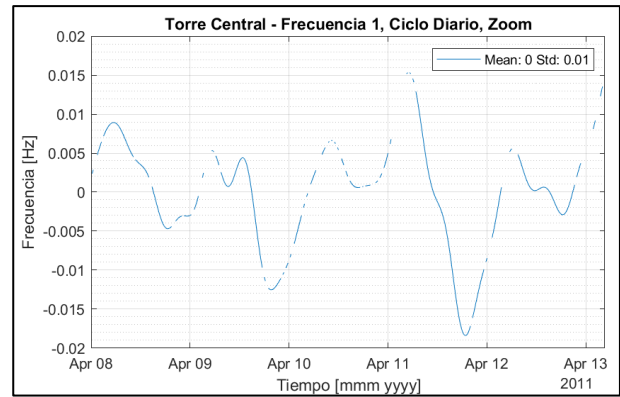
Para obtener la componente diaria de la data, se calcula el ciclo diario promedio para distintas sumas acumuladas de componentes, y se obtiene que la suma de las componentes de 24hrs, 12hrs y 8hrs reflejan el ciclo diario de la señal. En la Figura 4.35 a la Figura 4.36 se muestra el resultado de la componente diaria. Con respecto a la componente estacional de la data, se tiene que esta corresponde a la primera



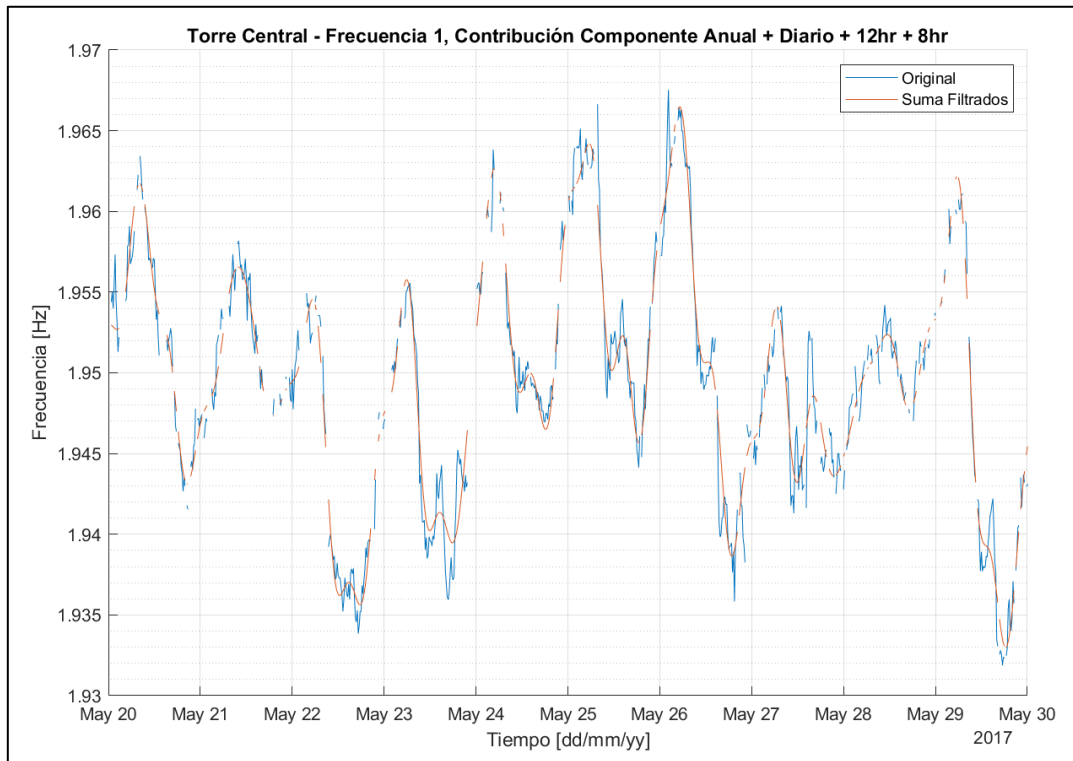
componente del filtrado (ciclo anual). Finalmente, en la Figura 4.37 se ve la componente estacional y diaria sumadas, graficadas junto a la data original. Se observa que, a pesar del porcentaje de data vacía en la señal, se mantiene la calidad de la señal original.



**Figura 4.35: Torre Central, frecuencia modal 1, Ciclo Diario.**



**Figura 4.36: Torre Central, frecuencia modal 1, Ciclo Diario. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**

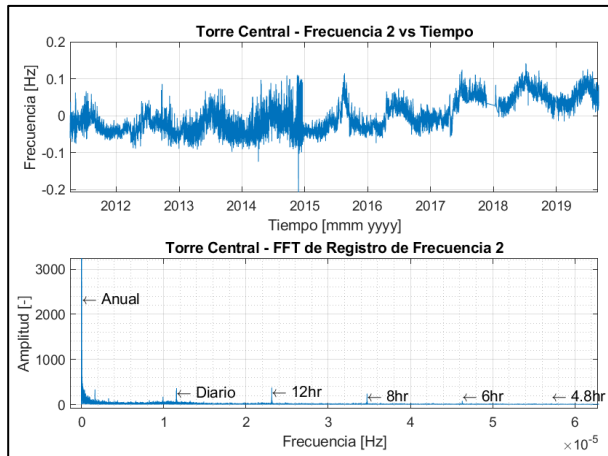


**Figura 4.37: Torre Central, frecuencia modal 1, comparación señal original vs filtrada. Ventana de tiempo desde 20/may/17 hasta 30/may/17.**

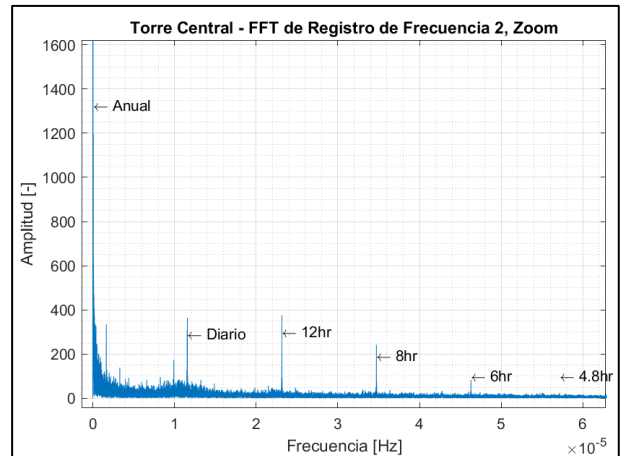


#### 4.2.4. Frecuencia Modal 2

En la Figura 4.38 se muestra la transformada de Fourier de la frecuencia modal 2, así como se muestra la señal previamente procesada para una correcta aplicación de la transformada de Fourier. Se muestra un acercamiento a la transformada de Fourier en la Figura 4.39. En la Tabla 4.4 se detallan los 5 primeros valores de frecuencia identificados, y su periodo correspondiente. Estos valores también se marcan en la Figura 4.38 a la Figura 4.39.



**Figura 4.38: Torre Central, frecuencia modal 2. Superior: señal procesada previa aplicación de transformada de Fourier. Inferior: transformada de Fourier de la señal.**

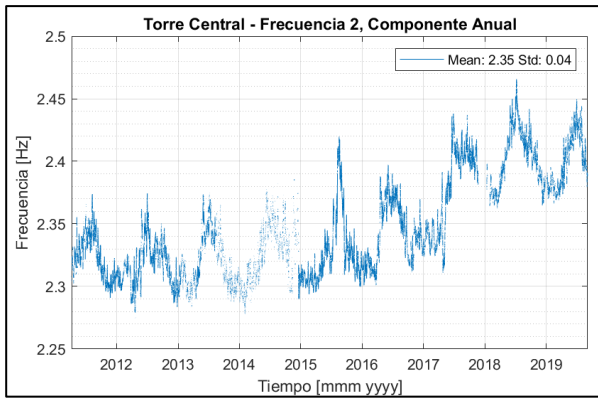


**Figura 4.39: Torre Central, frecuencia modal 2. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**

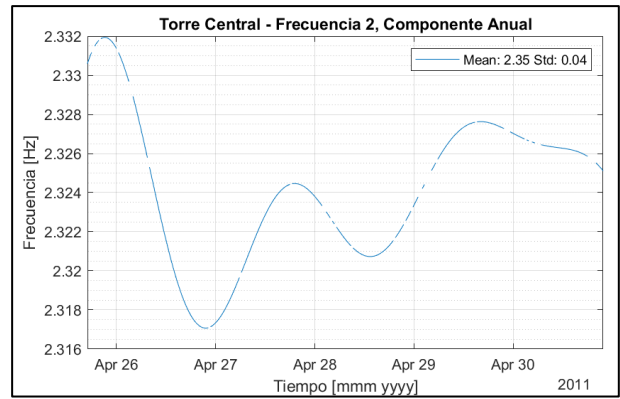
**Tabla 4.4: Torre Central, frecuencia modal 2, frecuencias identificadas.**

Componente identificada	1	2	3	4	5	6 (teórica)
Frecuencia [Hz]	3.111e-8	1.157e-5	2.315e-5	3.472e-5	4.630e-5	n.a.
Periodo [-]	1.019 años	24 horas	12 horas	8 horas	6 horas	4.8 horas

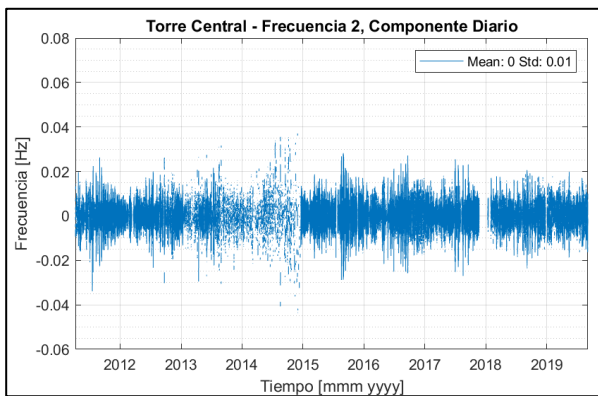
En este caso solo se identifican 5 componentes de frecuencias. Se indica la ubicación teórica de la sexta componente en la Figura 4.38 y la Figura 4.39. En la transformada de Fourier se detectan máximos locales externos (causados por el proceso de interpolación) alrededor de la primera y segunda componente. Se procede a filtrar las primeras 5 componentes. Los resultados de las primeras 3 componentes se muestran de la Figura 4.40 a la Figura 4.45. Las componentes restantes se muestran en la sección A.4.4 de los anexos.



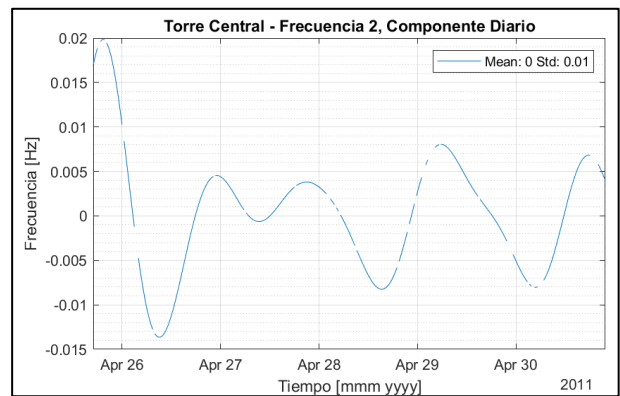
**Figura 4.40: Torre Central, freq. modal 2, Comp. Anual.**



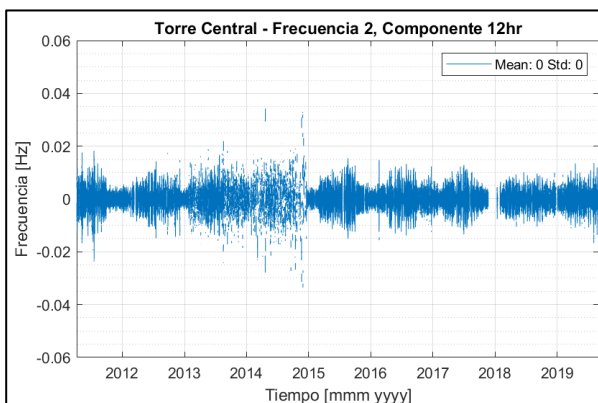
**Figura 4.41: Torre Central, freq. modal 2, Comp. Anual. Ventana de tiempo desde 26/apr/11 hasta 01/may/11.**



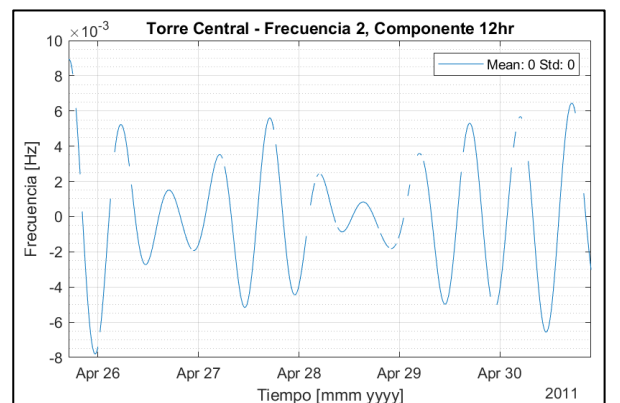
**Figura 4.42: Torre Central, freq. modal 2, Comp. 24 hrs.**



**Figura 4.43: Torre Central, freq. modal 2, Comp. 24 hrs. Ventana de tiempo desde 26/apr/11 hasta 01/may/11.**



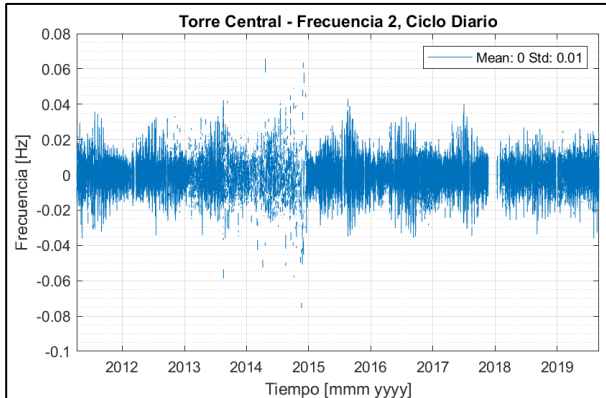
**Figura 4.44: Torre Central, freq. modal 2, Comp. 12 hrs.**



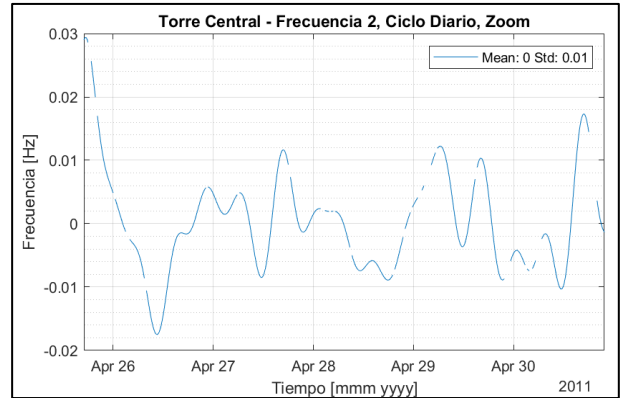
**Figura 4.45: Torre Central, freq. modal 2, Comp. 12 hrs. Ventana de tiempo desde 26/apr/11 hasta 01/may/11.**

Para obtener la componente diaria de la data, se calcula el ciclo diario promedio para distintas sumas acumuladas de componentes, y se obtiene que la suma de las componentes de 24hrs, 12hrs y 8hrs reflejan el ciclo diario de la señal. De la Figura 4.46 a la Figura 4.47 se muestra el resultado de la componente diaria. Con respecto a la

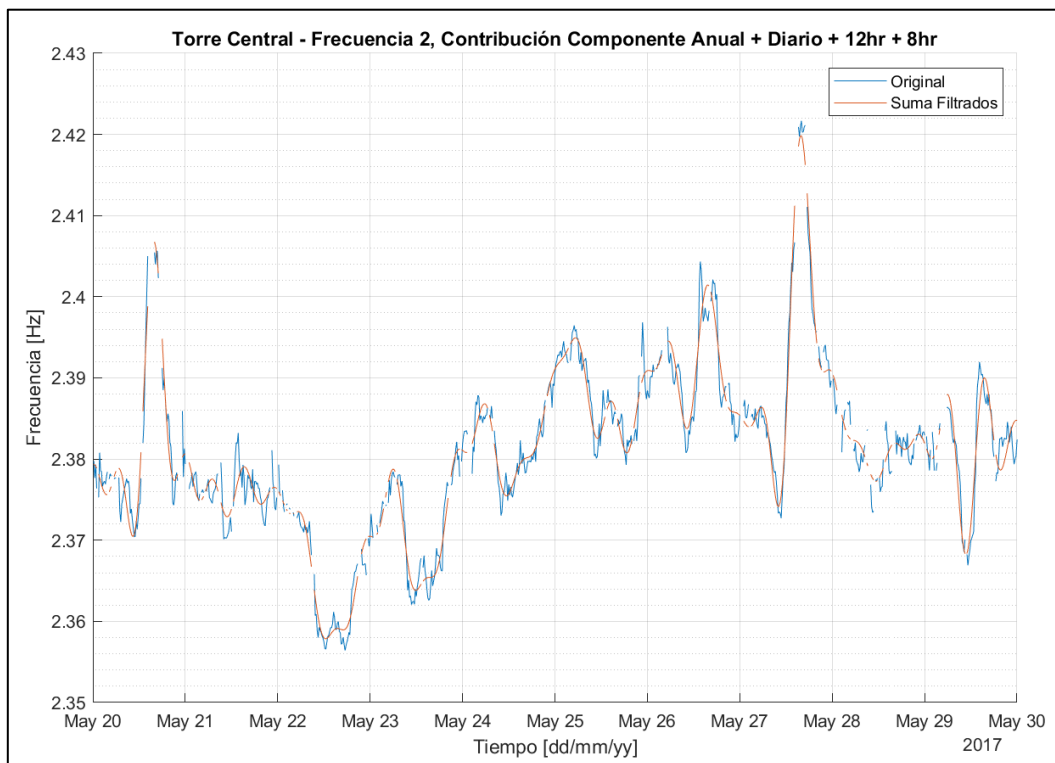
componente estacional de la data, se tiene que esta corresponde a la primera componente del filtrado (ciclo anual). Finalmente, en la Figura 4.48 se ve la componente estacional y diaria sumadas, graficadas junto a la data original. Se observa que, a pesar del porcentaje de data vacía en la señal, se mantiene la calidad de la señal original.



**Figura 4.46: Torre Central, frecuencia modal 2, Ciclo Diario.**



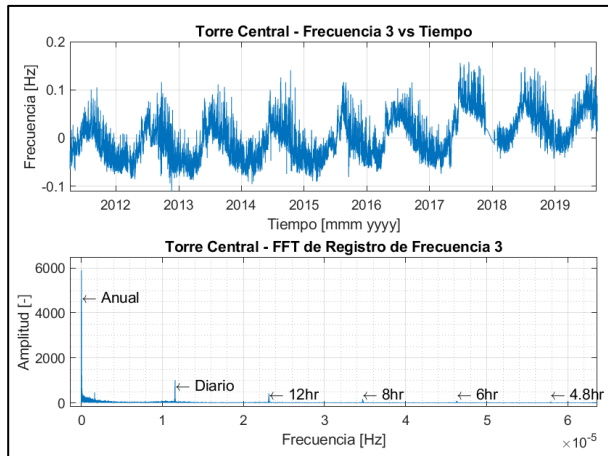
**Figura 4.47: Torre Central, frecuencia modal 2, Ciclo Diario. Ventana de tiempo desde 26/apr/11 hasta 31/apr/11.**



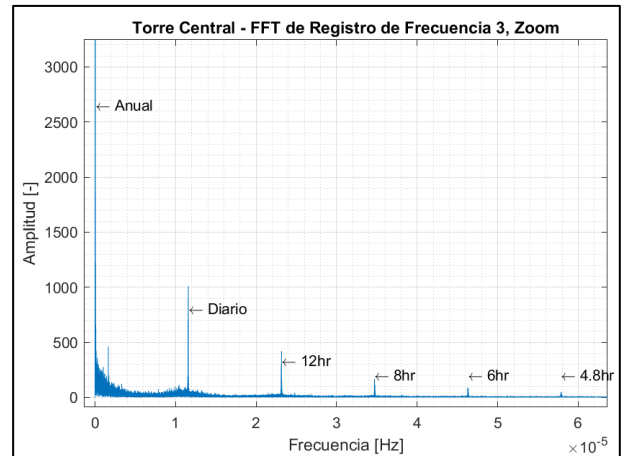
**Figura 4.48: Torre Central, frecuencia modal 2, comparación señal original vs filtrada. Ventana de tiempo desde 20/may/17 hasta 30/may/17.**

### 4.2.5. Frecuencia Modal 3

En la Figura 4.49 se muestra la transformada de Fourier de la frecuencia modal 3, así como se muestra la señal previamente procesada para una correcta aplicación de la transformada de Fourier. Se muestra un acercamiento a la transformada de Fourier en la Figura 4.50. En la Tabla 4.5 se detallan los 6 primeros valores de frecuencia identificados, y su periodo correspondiente. Estos valores también se marcan en la Figura 4.49 a la Figura 4.50.



**Figura 4.49: Torre Central, frecuencia modal 3. Superior: señal procesada previa aplicación de transformada de Fourier. Inferior: transformada de Fourier de la señal.**

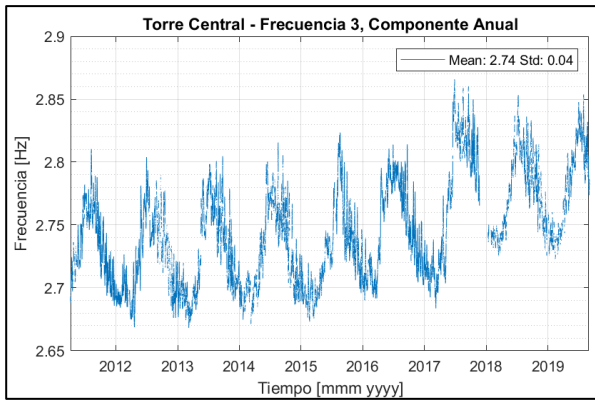


**Figura 4.50: Torre Central, frecuencia modal 3. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**

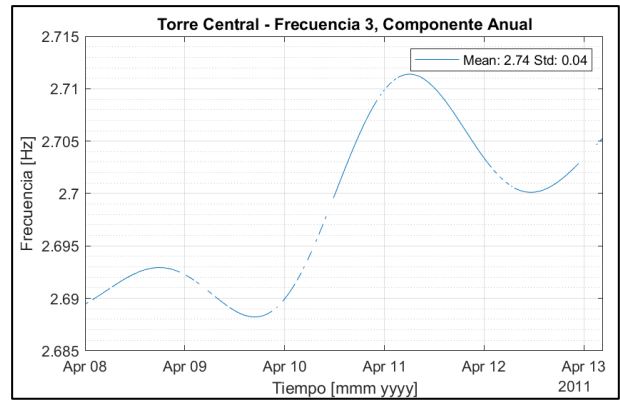
**Tabla 4.5: Torre Central, frecuencia modal 3, frecuencias identificadas.**

Frecuencia identificada	1	2	3	4	5	6
<b>Frecuencia [Hz]</b>	3.222e-8	1.157e-5	2.315e-5	3.469e-5	4.626e-5	5.784e-5
<b>Periodo [-]</b>	1.019 años	24 horas	12 horas	8 horas	6 horas	4,8 horas

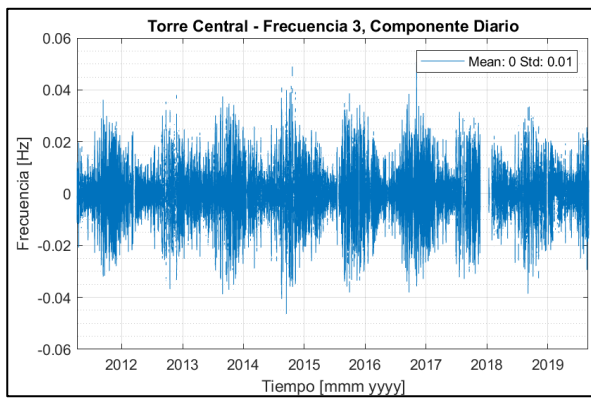
En la transformada de Fourier se detectan un máximo local externos (causado por el proceso de interpolación) alrededor de la primera componente. Se procede a filtrar las primeras 6 componentes. Los resultados de las primeras 3 componentes se muestran en la Figura 4.51 a la Figura 4.56. Las componentes restantes se muestran en la sección A.4.5 de los anexos.



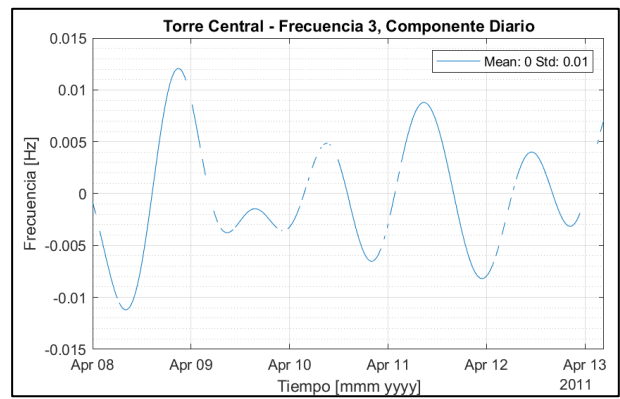
**Figura 4.51: Torre Central, freq. modal 3, Comp. Anual.**



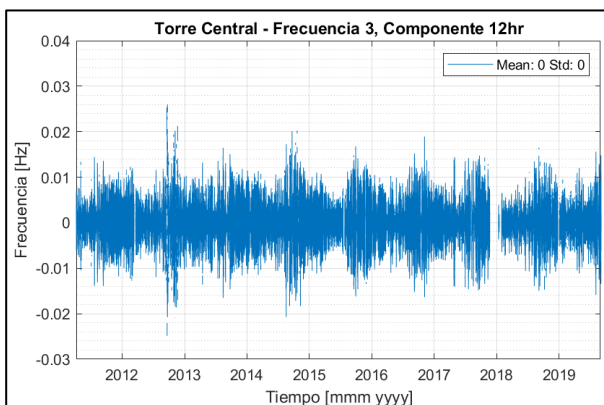
**Figura 4.52: Torre Central, freq. modal 3, Comp. Anual. hrs. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**



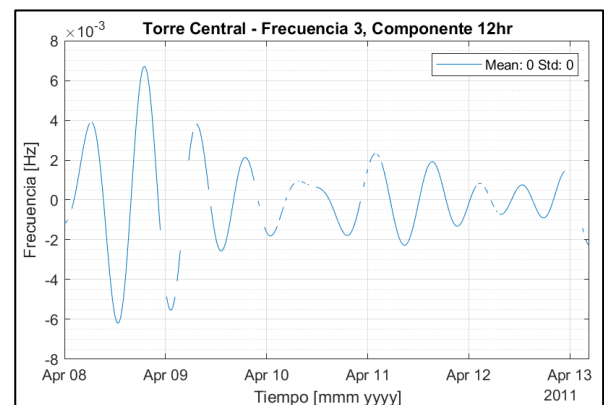
**Figura 4.53: Torre Central, freq. modal 3, Comp. 24 hrs.**



**Figura 4.54: Torre Central, freq. modal 3, Comp. 24 hrs. hrs. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**



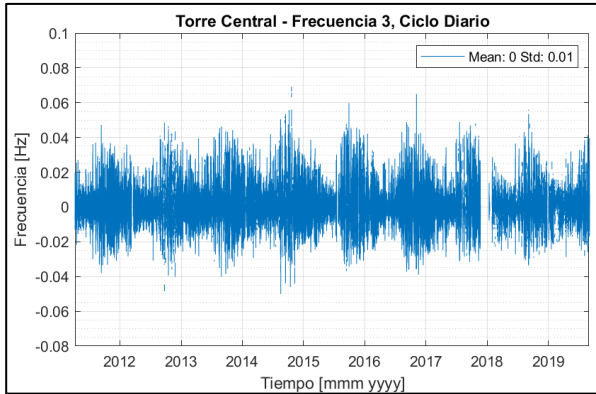
**Figura 4.55: Torre Central, freq. modal 3, Comp. 12 hrs.**



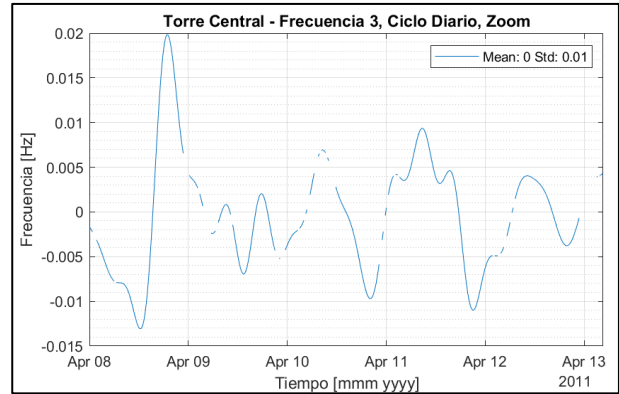
**Figura 4.56: Torre Central, freq. modal 3, Comp. 12 hrs. hrs. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**

Para obtener la componente diaria de la data, se calcula el ciclo diario promedio para distintas sumas acumuladas de componentes, y se obtiene que la suma de las componentes de 24hrs, 12hrs y 8hrs reflejan el ciclo diario de la señal. De la Figura 4.57 a la Figura 4.58 se muestra el resultado de la componente diaria. Con respecto a la

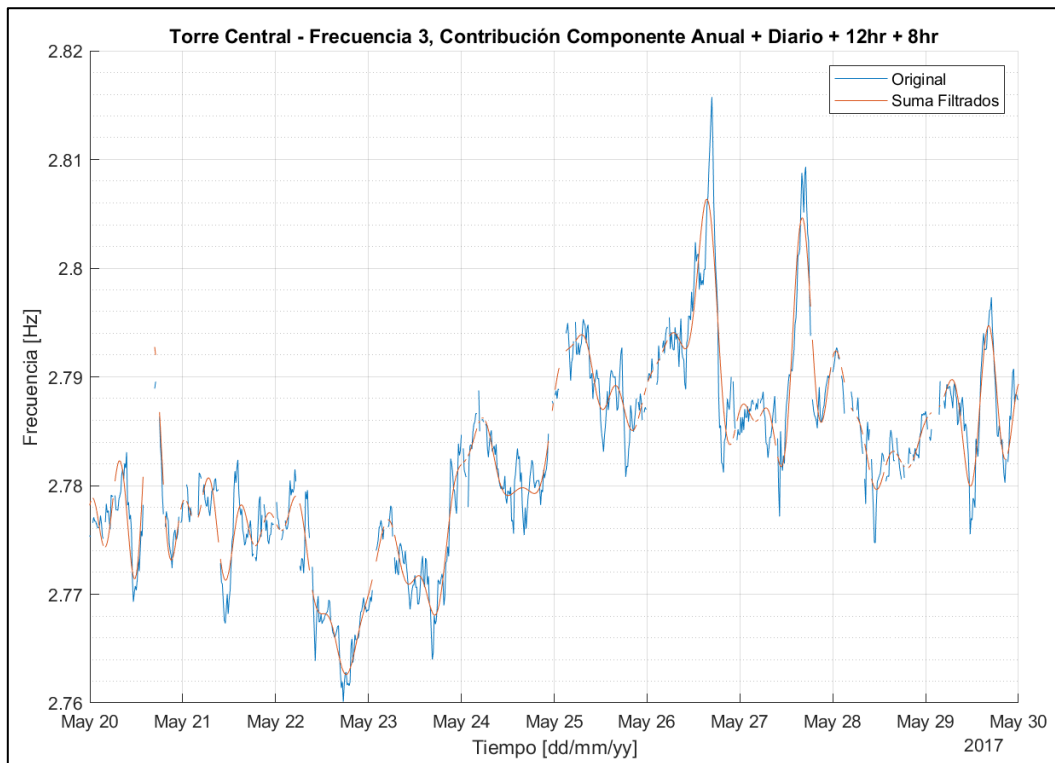
componente estacional de la data, se tiene que esta corresponde a la primera componente del filtrado (ciclo anual). Finalmente, en la Figura 4.59 se ve la componente estacional y diaria sumadas, graficadas junto a la data original. Se observa que, a pesar del porcentaje de data vacía en la señal, se mantiene la calidad de la señal original.



**Figura 4.57: Torre Central, frecuencia modal 3, Ciclo Diario.**



**Figura 4.58: Torre Central, frecuencia modal 3, Ciclo Diario. Ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 13/apr/11.**



**Figura 4.59: Torre Central, frecuencia modal 3, comparación señal original vs filtrada. Ventana de tiempo desde 20/may/17 hasta 30/may/17.**

### 4.3 Estructuras Restantes

En las secciones A.4.6 hasta la A.4.27 de los anexos se encuentran los resultados del filtrado de componentes para las siguientes estructuras:

- Iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas
- Iglesia de San Juan Bautista de Huaró
- Muros de Adobe de Laboratorio, Muros Tipo I, II y III

El filtrado de componentes se pudo aplicar correctamente en estas estructuras, logrando separar comportamiento diario y estacional. En términos de procedimiento, los filtrados y determinación de componentes se realizaron de la misma manera para el caso de Torre Central. Tal como fue el caso de Torre Central, se observa que se obtienen mejor calidad de filtrados para los registros que presentan menores cantidad de vacíos de data. En particular, para el caso de las estructuras tipo iglesia, a pesar de que el comportamiento diario en las frecuencias modales no estaba bien definido, la componente diaria filtrada logra seguir una tendencia similar a lo observado en los registros modales originales de las iglesias. Por otro lado, para el caso de los muros de adobe de laboratorio, se observa que la componente estacional de las frecuencias modales muestra principalmente el efecto de endurecimiento del muro. Para el caso de la componente diaria, se tiene que esta no presenta variaciones producto de endurecimiento del muro.

## Capítulo 5 : ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DIARIA Y ESTACIONAL

### 5.1 Análisis del Ciclo Diario

Una vez realizado el filtrado de componentes y ya identificada la componente diaria de las variables de interés, el paso siguiente es comparar cada una de estas componentes diarias. Como ya se indicó anteriormente, esta comparación no se realizará en términos de amplitud, sino que se analizará cómo es el desfase que ocurre entre la señal ambiental (temperatura ambiental o humedad absoluta) y la respuesta de cada frecuencia modal. Se asumirá además la posibilidad de que el desfase entre acción (señal ambiental) y respuesta (señal de frecuencia modal) no sea necesariamente constante a través del tiempo. En esta sección se explicará en detalle el procedimiento ocupado en esta memoria para calcular el desfase entre componentes diarias.

En la Figura 5.1 se muestra de ejemplo una comparación entre componentes diarias de una señal de temperatura ambiental y una señal de frecuencia modal, mientras que en la Figura 5.2 se presenta un acercamiento diario de la comparación, donde es posible apreciar el desfase entre ambas señales. Estos datos corresponden a resultados procesados del edificio de Torre Central: la componente diaria de la temperatura ambiental y la componente diaria de la primera frecuencia modal de edificio. Estos resultados específicos se mostrarán en esta sección únicamente con el fin de ejemplificar el procedimiento usado, por lo que no se ahondará en la naturaleza de estos.

Para calcular el desfase entre las señales para diferentes instantes de tiempo, se realizará un análisis local mediante ventanas. Este consiste en analizar múltiples rangos discretos de tiempo (ventanas) provenientes de la señal a analizar y calcular el desfase puntual que resulta de cada una de las ventanas generadas. Esto logra analizar el desfase para diferentes secciones de la señal, contrario a analizar un solo desfase para el rango completo de la señal. El largo de ventana a utilizar debe ser tal que se pueda distinguir el desfase entre las dos señales, pero no lo suficientemente grande para perder la información de la variación del desfase en la señal. El avance entre ventanas sucesivas es variable, pero se busca hacer un balance entre una mayor calidad/definición de resultado y la rapidez de cálculo del algoritmo.

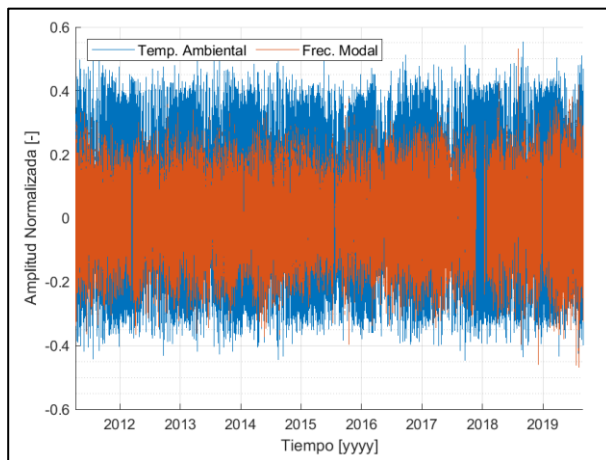
El procedimiento aplicado en esta memoria se explica y ejemplifica a continuación:

- 1) Se asignará un tamaño de ventana de tiempo a analizar. En la Figura 5.3 se observa una ventana de largo de 3 días, generada a partir de la señal original de la Figura 5.2.
- 2) Se asigna un valor de avance entre ventanas sucesivas. Se asignó un valor de 0.5 días para el caso de la Figura 5.3.
- 3) Para la ventana generada, se calculará el porcentaje de datos vacíos para la señal de frecuencia modal (ver Figura 5.3). Si este valor supera un cierto umbral

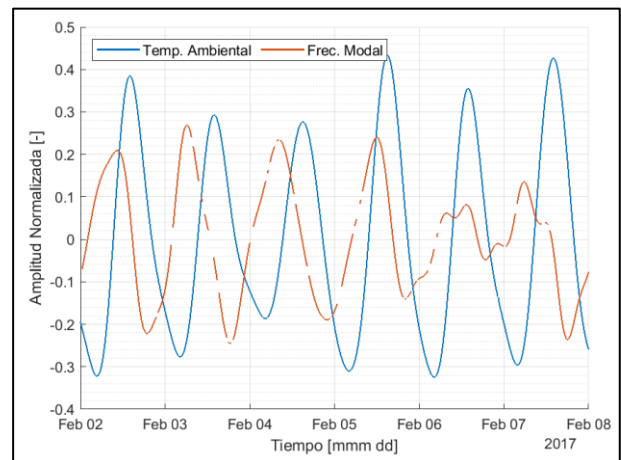


(límite impuesto por el usuario, usualmente de un 60%), se descartará la ventana generada y se avanzará a la siguiente ventana.

- 4) Si el porcentaje de datos vacíos de la ventana se encuentra bajo el límite impuesto, se interpolarán los datos vacíos del rango de frecuencia modal en la ventana, tal como se muestra en la Figura 5.4.
- 5) Se procede a calcular el desfase entre ambas señales de la ventana, asumiendo que la respuesta de la frecuencia modal siempre va después que la señal ambiental. En el párrafo siguiente de esta subsección se explica el detalle de cómo se calculó el desfase entre dos señales. En el caso de la Figura 5.4 se obtiene un desfase de 16.5 horas. Este desfase obtenido es un promedio respecto al desfase de los todos máximos/mínimos presentes en la ventana. Solo para verificación, en la Figura 5.4 se incluyeron manualmente marcas de tiempo para desfases entre máximos/mínimos locales, las cuales confirman el valor de desfase promedio calculado de 16.5 horas.
- 6) El desfase calculado se asigna a la fecha correspondiente al tiempo en la mitad de la ventana. Para el ejemplo de la Figura 5.4, se tiene que el desfase de 16.5 horas corresponde a la fecha de 03 de febrero de 2017 a las 12:00 AM. En el caso que no se haya podido calcular un desfase para la ventana (debido a un porcentaje elevado de valores vacíos de la frecuencia modal), se asigna un valor vacío de desfase a la fecha correspondiente de la ventana.
- 7) Se repite el proceso para las diferentes ventanas a generar, manteniendo consistente el avance de ventana asignado en 2).
- 8) Finalmente, se grafican todos los desfases calculados de cada ventana en un gráfico de fecha versus desfase calculado.



**Figura 5.1: Comparación de ejemplo entre componentes diarias de temperatura y frecuencia modal.**



**Figura 5.2: Comparación de ejemplo entre componentes diarias de temperatura y frecuencia modal, acercamiento diario.**

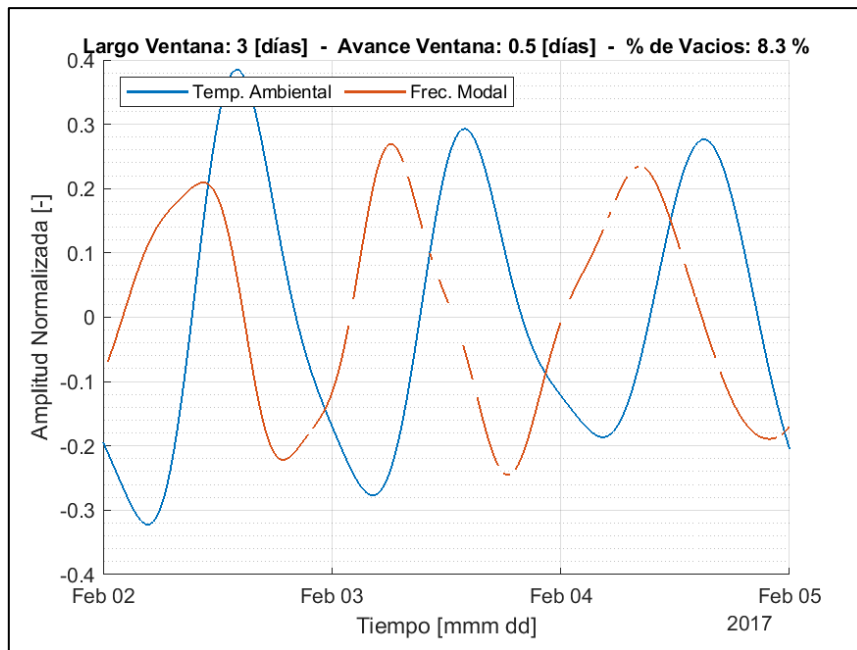


Figura 5.3: Comparación de ejemplo entre componentes diarias de temperatura y frecuencia modal. Ventana generada desde el 02-febrero-2017 hasta el 05-febrero-2017.

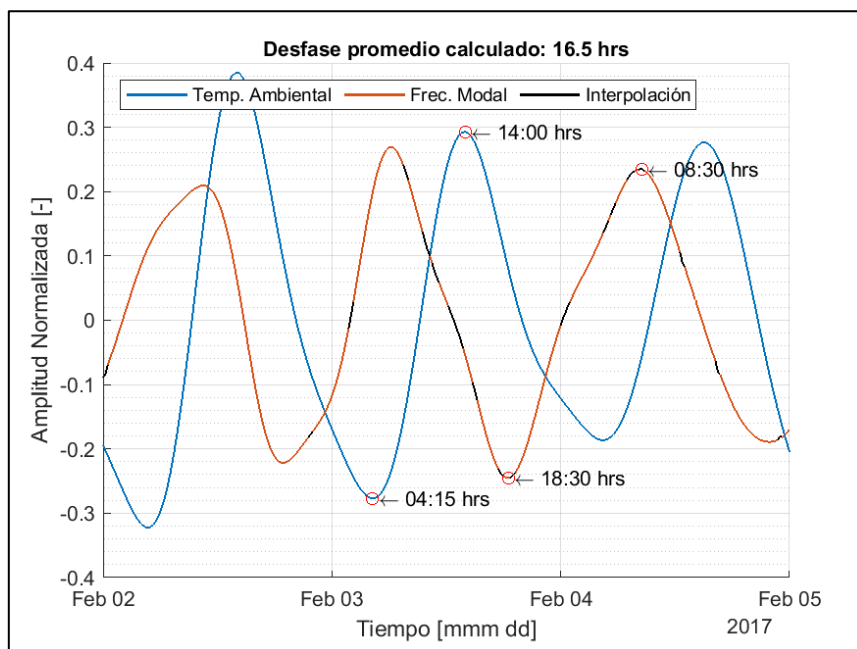
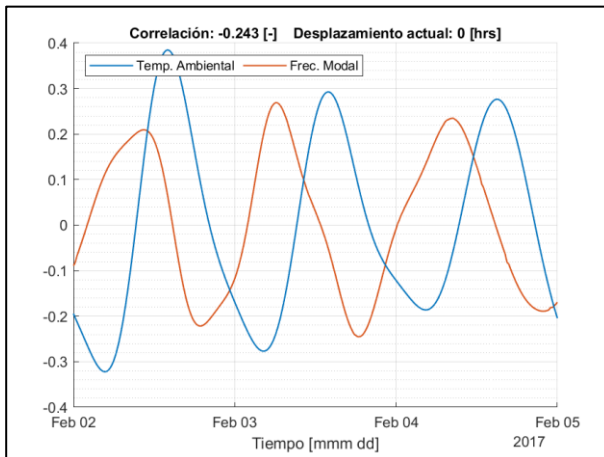


Figura 5.4: Comparación de ejemplo entre componentes diarias de temperatura y frecuencia modal. Ventana interpolada.

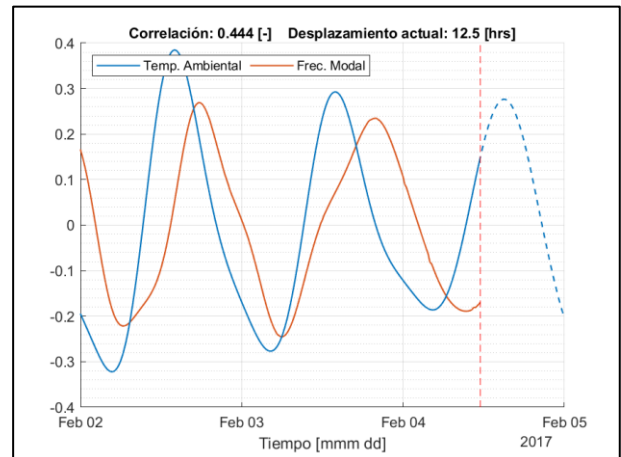
Por último, se describirá el algoritmo que calcula el desfase entre dos señales. Se utilizará de ejemplo el caso de la Figura 5.4. Para calcular el desfase de la frecuencia modal, se calculará la correlación entre la señal ambiental y la señal modal para diferentes posiciones en el tiempo de la señal modal. De la Figura 5.5 a la Figura 5.8 se observa este proceso, donde primero se calcula la correlación para la posición inicial de ambas señales (Figura 5.5,  $Corr = -0.243$ ), valor que incrementa a medida que se

desplaza la frecuencia modal (Figura 5.6,  $Corr = 0.444$ ), hasta que llega a un valor de correlación máximo para un cierto valor de desplazamiento (Figura 5.7,  $Corr = 0.943$ ), valor que procede a disminuir a partir de este punto para los siguientes desplazamientos a la señal (Figura 5.8,  $Corr = 0.575$ ). Este valor de correlación máximo encontrado indica cual es el mejor valor de desfase promedio para ventana analizada. Se refiere a desfase promedio debido a que es el valor que mejor se ajusta al desfase de los todos máximos/mínimos presentes en la ventana. Se debe notar que el valor de correlación entre ambas señales se calcula entre el inicio de la ventana hasta el fin de la señal modal (ver Figura 5.6 a Figura 5.8). Dado que se desplaza la señal de frecuencia modal hacia atrás, un rango de la señal ambiental queda excluido (rango línea punteada), el cual por simplicidad se ignorará en el cálculo de correlación.

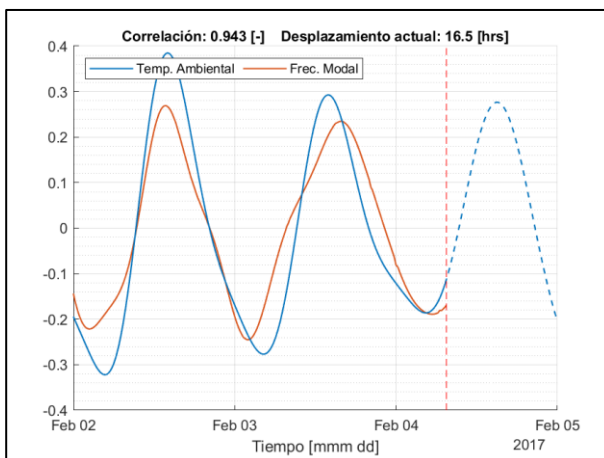
Finalmente, al momento de presentar los resultados de este análisis para cada edificio, se especificará la configuración del algoritmo utilizada (largo de ventana, avance de ventana, etc.).



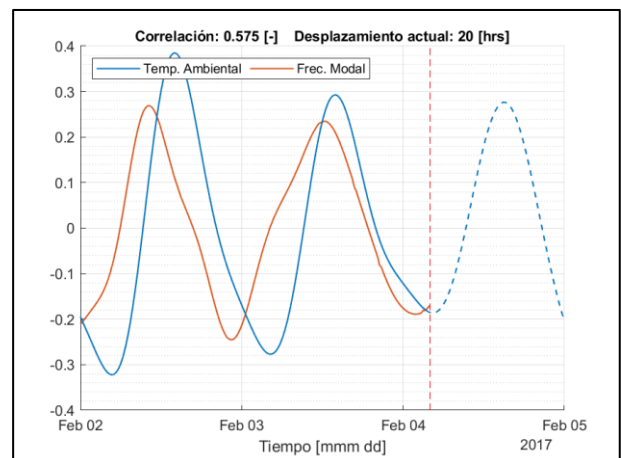
**Figura 5.5: Explicación de cálculo de desfase, situación 1.**



**Figura 5.6: Explicación de cálculo de desfase, situación 2.**



**Figura 5.7: Explicación de cálculo de desfase, situación 3.**

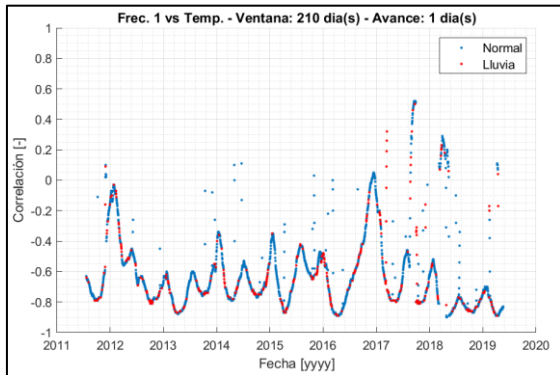


**Figura 5.8: Explicación de cálculo de desfase, situación 4.**

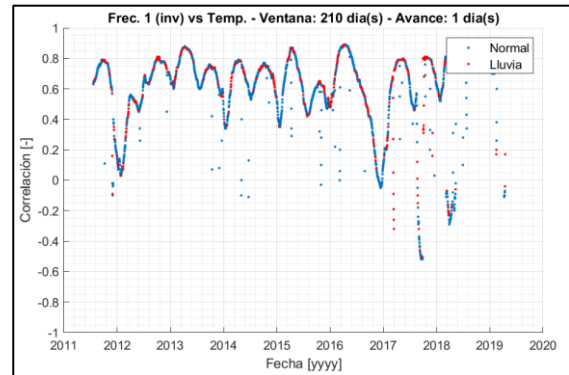
## 5.2 Torre Central

### 5.2.1. Análisis Estacional

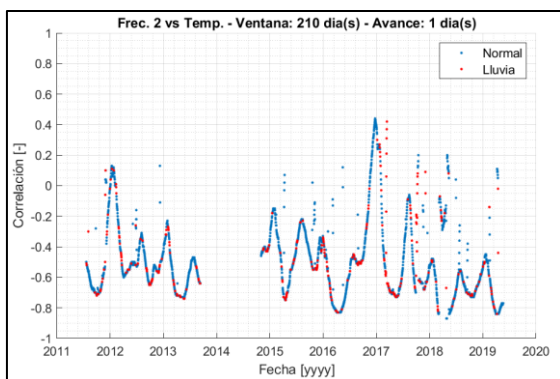
En la Figura 5.9, Figura 5.11 y Figura 5.13 se muestra un análisis por correlación entre la componente estacional de la temperatura ambiental contra la componente estacional de cada frecuencia modal a analizar. Este análisis de correlación consiste en calcular la correlación de las señales de interés mediante un método de ventana móvil. Para el caso de Torre Central, se utilizó una ventana móvil de 210 días de largo y un avance entre ventanas de 1 día. Adicionalmente, en la Figura 5.10, Figura 5.12 y Figura 5.14, se realiza el mismo análisis por correlación, excepto que se invierte previamente la señal de frecuencia modal (con respecto a su amplitud). Esto se hace para comprobar si la señal de frecuencia presenta mejores resultados al ser proporcional o inversamente proporcional a la señal de temperatura ambiental.



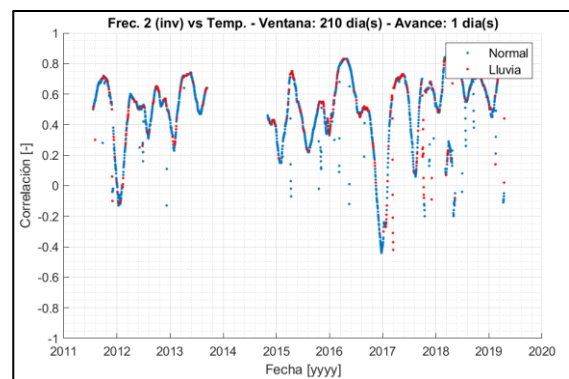
**Figura 5.9: Torre Central, análisis por correlación entre componentes estacionales de temperatura y frec. modal 1.**



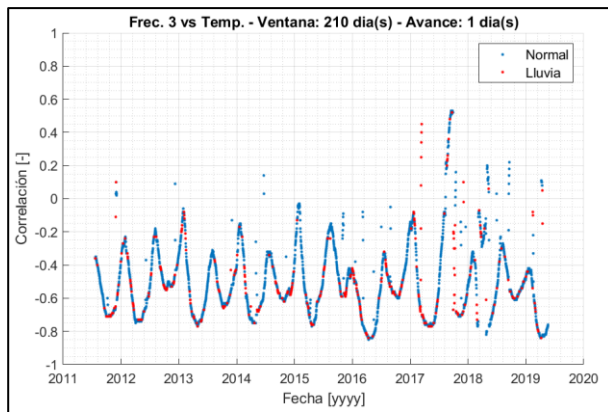
**Figura 5.10: Torre Central, análisis por correlación entre componentes estacionales de temperatura y frec. modal 1 (invertida).**



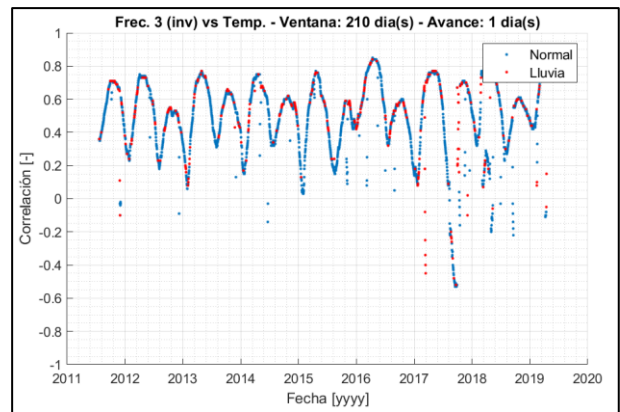
**Figura 5.11: Torre Central, análisis por correlación entre componentes estacionales de temperatura y frec. modal 2.**



**Figura 5.12: Torre Central, análisis por correlación entre componentes estacionales de temperatura y frec. modal 2 (invertida).**



**Figura 5.13: Torre Central, análisis por correlación entre componentes estacionales de temperatura y frec. modal 3.**



**Figura 5.14: Torre Central, análisis por correlación entre componentes estacionales de temperatura y frec. modal 3 (invertida).**

De los resultados del análisis de correlación, se identifica que se obtienen correlaciones mayormente positivas para el caso de frecuencia modal invertida, mientras que para el caso de frecuencia modal (no invertida) se obtienen correlaciones negativas. Además, se tiene que, para las tres frecuencias modales analizadas, todas presentan la mejor correlación en el caso de frecuencia invertida. Este hecho podría sugerir una relación inversa entre la temperatura ambiental y las frecuencias modales de la estructura.

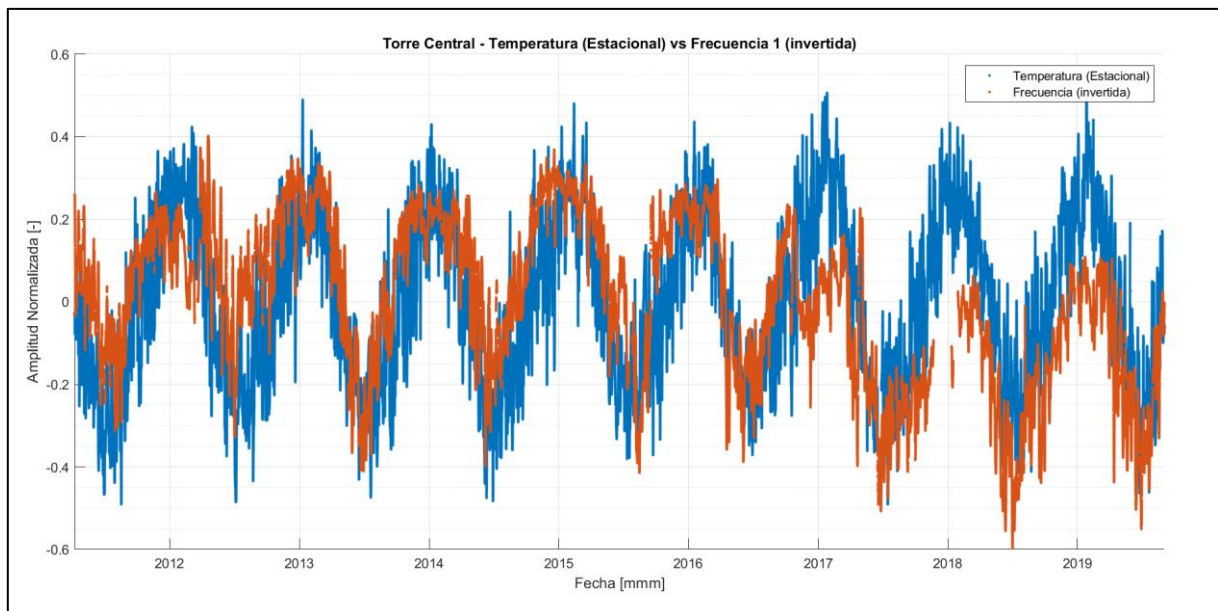
En la Figura 5.15 a la Figura 5.17 se muestra la comparación entre la componente estacional de la temperatura ambiental contra la componente estacional de cada frecuencia modal a analizar. Para realizar la comparación, se normalizó la amplitud de ambas señales, con el fin que ambas señales presenten magnitudes del mismo orden. Adicionalmente, la componente estacional de cada frecuencia modal fue invertida respecto a su amplitud, dado que el caso de frecuencias invertidas resulta en la mejor correlación al compararse con la señal de temperatura ambiental.

A partir de estas figuras, se realizan las siguientes observaciones:

- a) Para todas las frecuencias modales, se observa un comportamiento inversamente proporcional a la temperatura ambiental. Esto concuerda con los resultados del análisis por correlación.
- b) Para el caso de esta estructura, el desfase entre componente estacional de temperatura y frecuencia es prácticamente nulo (respecto a una escala de tiempo anual).
- c) Se observa que la temperatura ambiental presenta un comportamiento de transición agudo para sus máximos y mínimos estacionales: a inicio de cada año, en época de verano, cuando la temperatura estacional llega a su máximo y procede a disminuir, la transición ocurre rápidamente, generando un cambio brusco, similar a una señal triangular. El mismo comportamiento se presenta en la transición de invierno. Ahora, a pesar de que la frecuencia modal es

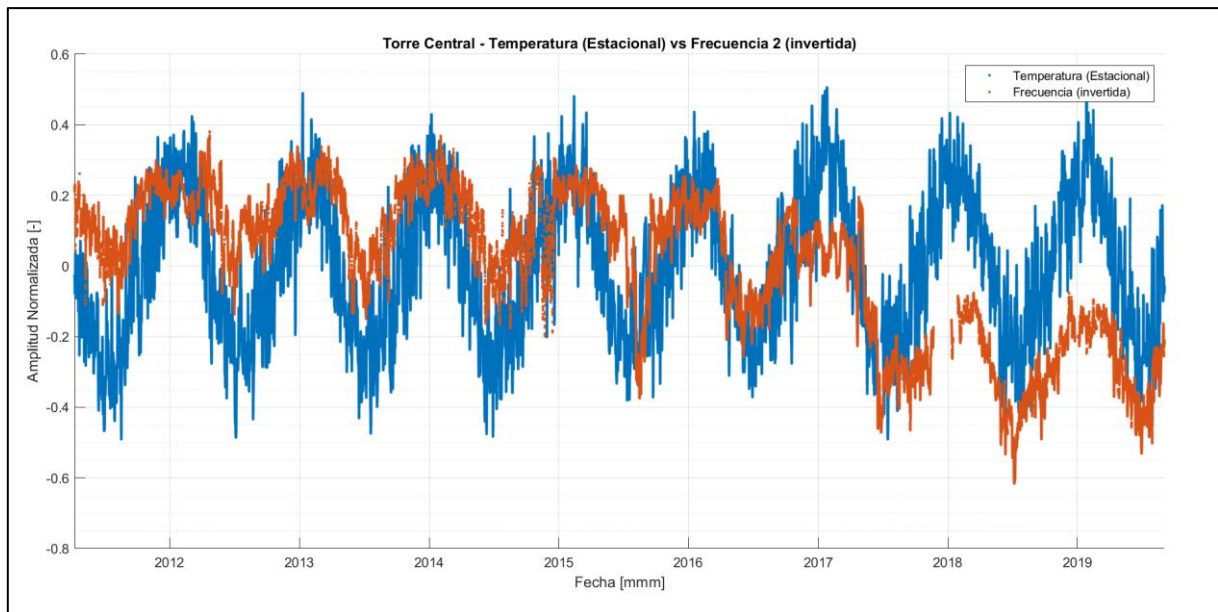
proporcionalmente inversa a la temperatura ambiental, esta no replica exactamente el comportamiento de la temperatura. En verano (inicio de cada año), cuando la temperatura realiza una transición aguda, la frecuencia modal en cambio presenta un mecanismo de transición más suave y continuo. Por otro lado, en invierno (mitad de cada año), el mecanismo de transición de la frecuencia modal se presenta agudo y brusco, de la misma manera que se comporta la temperatura. Este hecho afirma que el mecanismo de respuesta de la frecuencia modal ante cambios de temperatura ambiental es distinto según la estacionalidad.

- d) Los datos de transición entre máximos y mínimos presentan aproximadamente la misma pendiente entre ambas señales.
- e) Para todas las frecuencias modales, se observa un aumento (o disminución invertida) de la magnitud de frecuencia a partir de enero del 2017. Incluso con este aumento de frecuencia, los resultados mencionados anteriormente siguen siendo válidos sobre este rango.

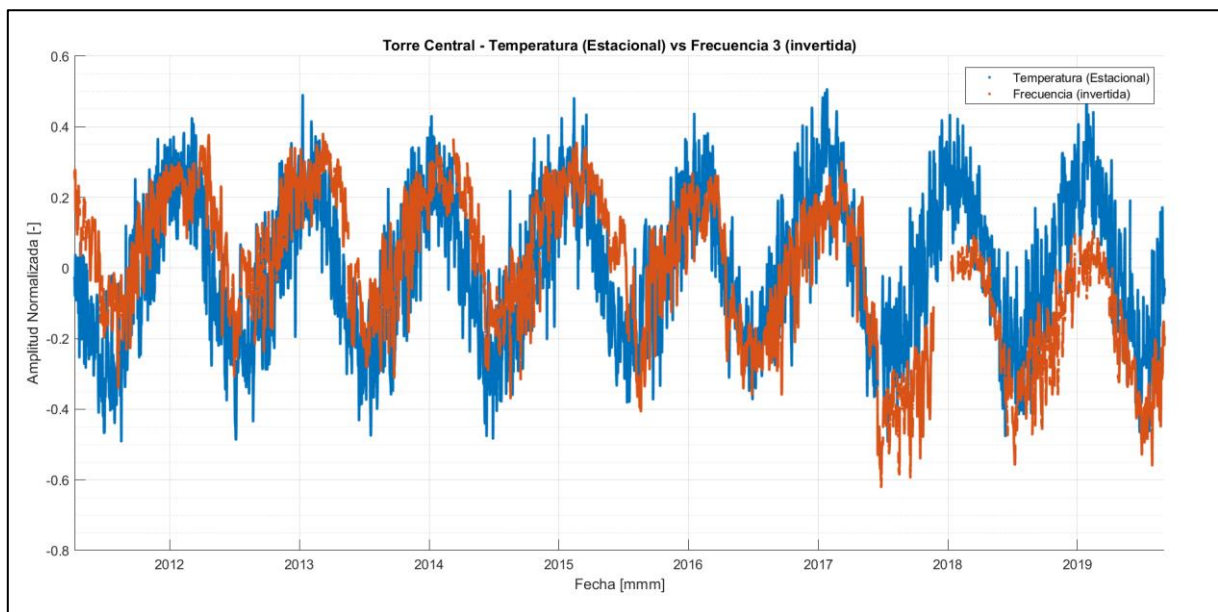


**Figura 5.15: Torre Central, comparación temperatura ambiental vs frecuencia modal 1 (componentes estacionales).**





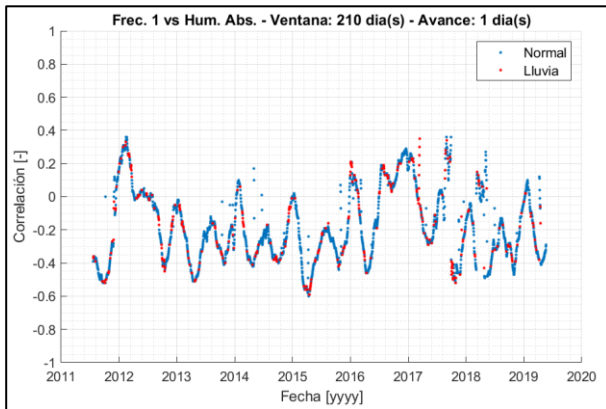
**Figura 5.16: Torre Central, comparación temperatura ambiental vs frecuencia modal 2 (componentes estacionales).**



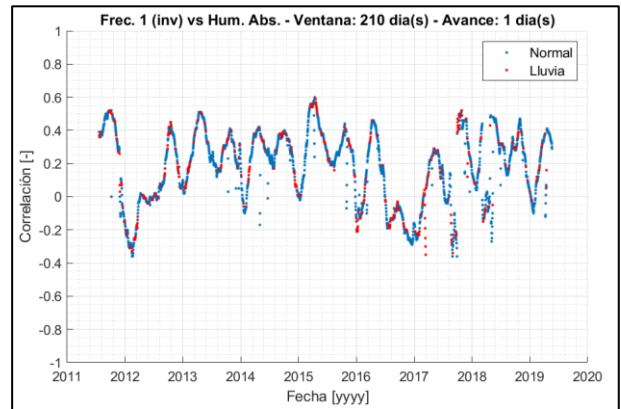
**Figura 5.17: Torre Central, comparación temperatura ambiental vs frecuencia modal 3 (componentes estacionales).**

A continuación, se realiza un análisis por correlación entre la componente estacional de la humedad absoluta y la componente estacional de cada frecuencia a analizar. En la Figura 5.18 a la Figura 5.23 se muestran los resultados del análisis por correlación, tanto para el caso de frecuencia modal invertida como no invertida. De estos resultados se observa que ambos casos presentan correlaciones relativamente débiles, siendo el caso de frecuencia invertida el que presenta las correlaciones más altas, pero sin presentar correlaciones fuertes. Se tiene que las correlaciones entre frecuencia modal y temperatura ambiental son más fuertes que el caso de frecuencia modal y humedad

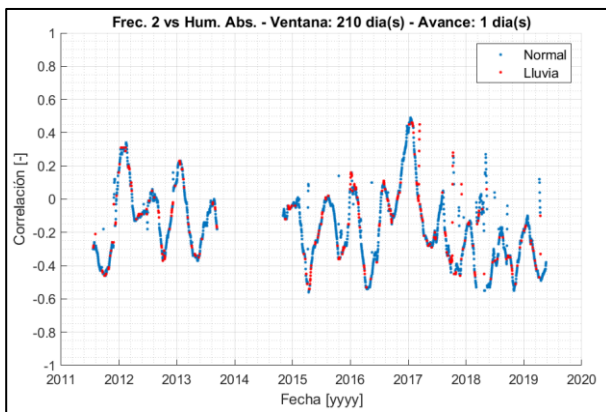
absoluta. Esto refuerza el hecho que, para el caso de Torre Central (estructura de hormigón armado), el mejor indicador medioambiental para las variaciones de frecuencia modal sea la temperatura ambiental.



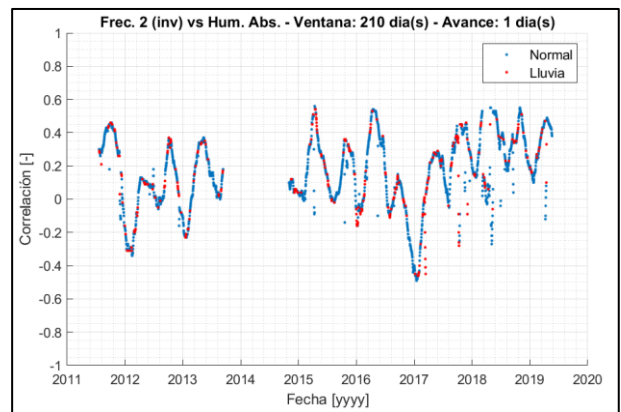
**Figura 5.18: Torre Central, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad abs. y frec. modal 1.**



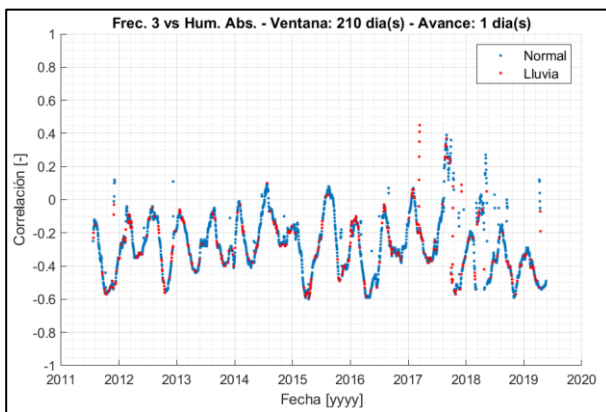
**Figura 5.19: Torre Central, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad abs. y frec. modal 1 (invertida).**



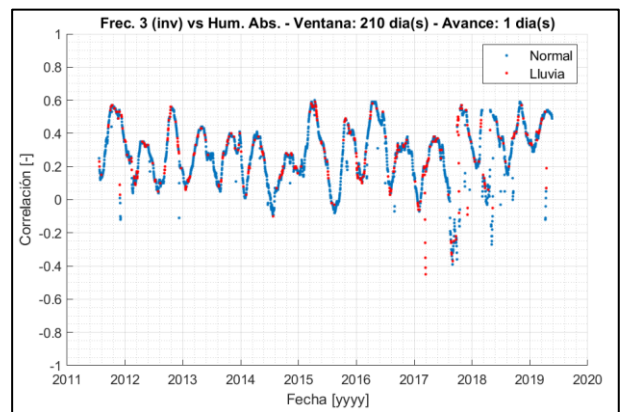
**Figura 5.20: Torre Central, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad abs. y frec. modal 2.**



**Figura 5.21: Torre Central, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad abs. y frec. modal 2 (invertida).**



**Figura 5.22: Torre Central, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad abs. y frec. modal 3.**

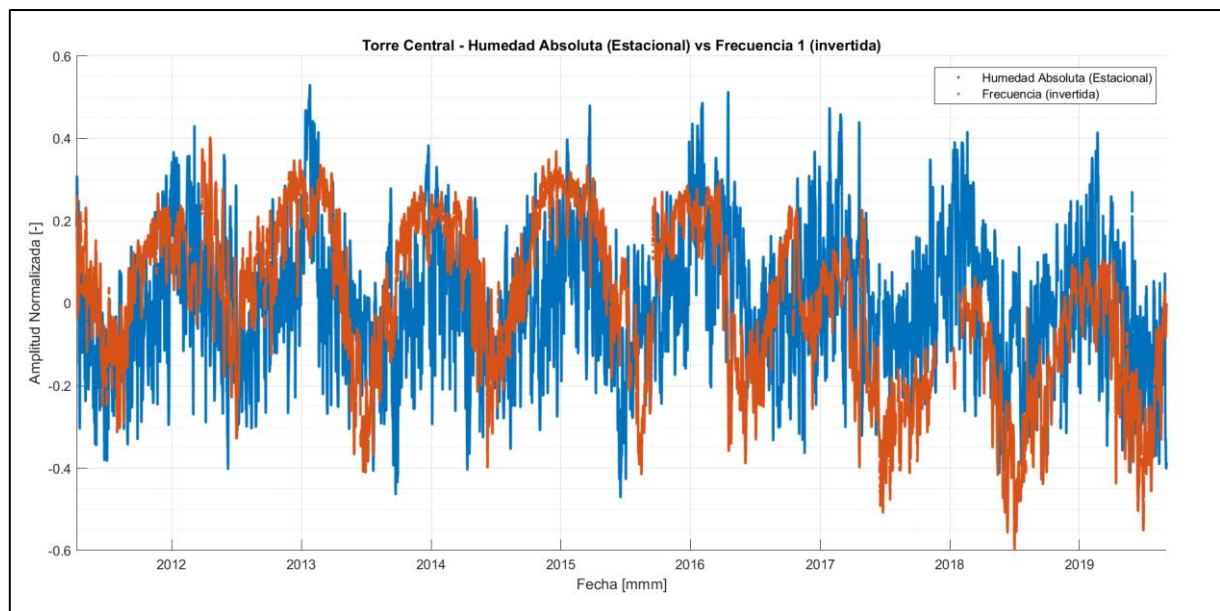


**Figura 5.23: Torre Central, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad abs. y frec. modal 3 (invertida).**



Por otro lado, se procede a comparar directamente la señal de humedad absoluta contra cada frecuencia modal (componentes estacionales). Los resultados se presentan de la Figura 5.24 a la Figura 5.26. Nuevamente, las señales fueron normalizadas y cada frecuencia modal invertida para una mejor comparación (reforzado). De estos resultados, se hacen las siguientes observaciones:

- a) La correlación visual entre datos no es tan buena como el caso de temperatura ambiental, tal como fue observado en el análisis de correlación. Se mantiene consistente el hecho que, para un edificio de hormigón armado, la humedad absoluta no sea tan buen indicador como la temperatura.
- b) Para todas las frecuencias modales, se observa un mecanismo inversamente proporcional a la humedad absoluta.



**Figura 5.24: Torre Central, comparación humedad absoluta vs frecuencia modal 1 (componentes estacionales).**

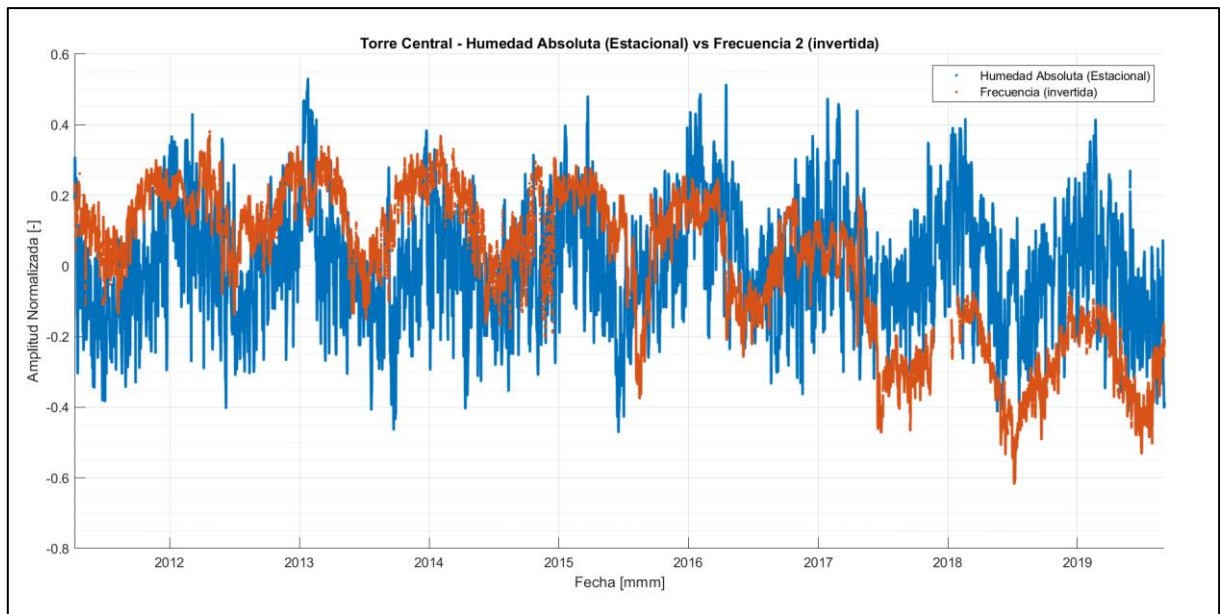


Figura 5.25: Torre Central, comparación humedad absoluta vs frecuencia modal 2 (componentes estacionales).

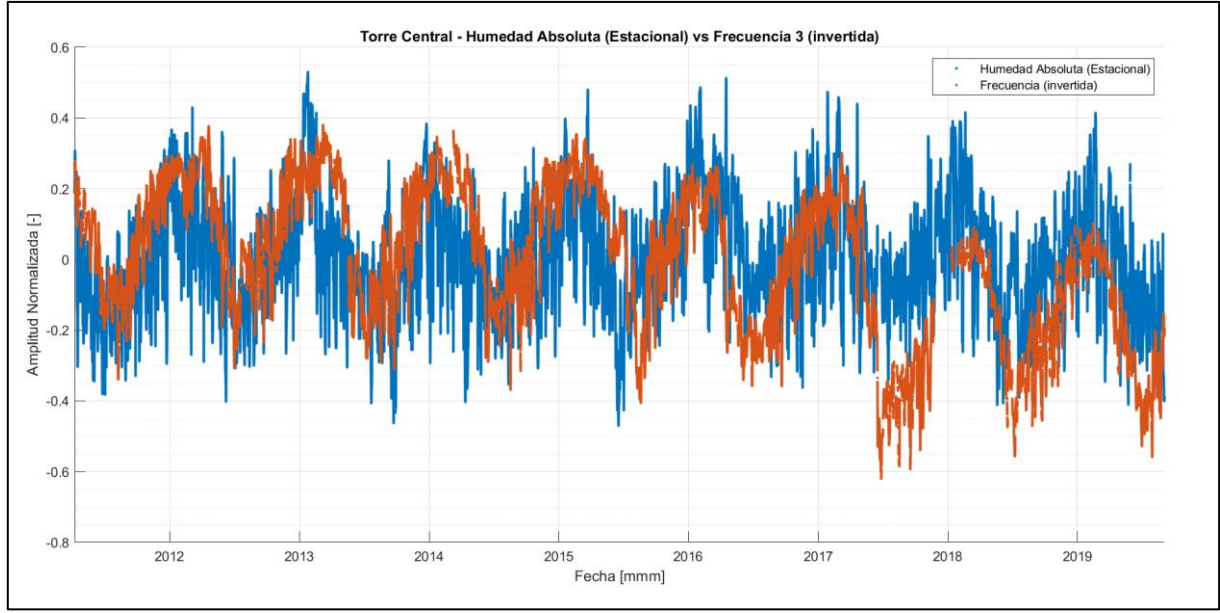


Figura 5.26: Torre Central, comparación humedad absoluta vs frecuencia modal 3 (componentes estacionales).

### 5.2.2. Análisis Diario

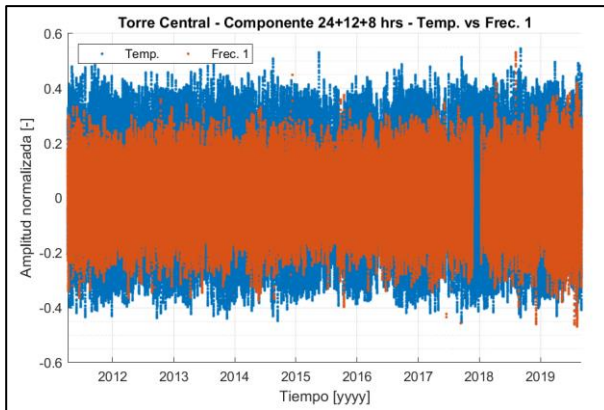
En la Figura 5.27 a la Figura 5.32 se muestra una comparación directa entre la componente diaria de la temperatura ambiental contra la componente diaria de cada frecuencia modal a analizar. Se muestra tanto una comparación a escala anual como una comparación con un acercamiento diario. Para efectos de esta comparación, no se procedió a invertir ninguna frecuencia modal al ser comparada con la temperatura; esto con el fin de poder observar el comportamiento del ciclo diario sin asumir previamente ningún tipo de comportamiento.

De estas figuras se tienen los siguientes resultados:

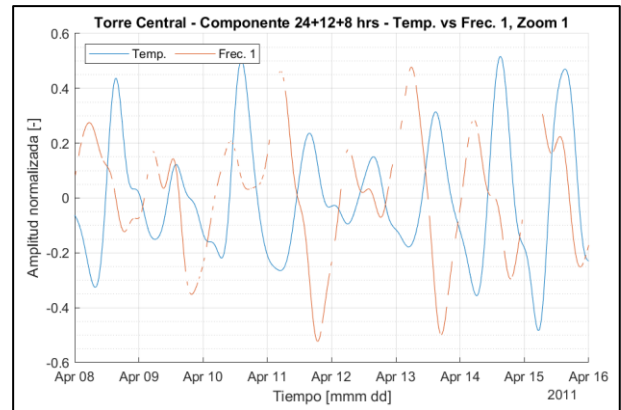
- a) Al realizar un acercamiento diario, se tiene que la señal de temperatura y la señal de frecuencia modal no se encuentran en fase. Esto indica que la respuesta de la frecuencia modal ante cambios de temperatura no es inmediata.
- b) No es directo identificar si el ciclo diario de la frecuencia modal presenta un comportamiento inversamente proporcional o no respecto al ciclo diario de la temperatura.
- c) Al realizar la comparación anual, se observan ciclos anuales para la segunda y tercera frecuencia modal (Figura 5.29 y Figura 5.30). Para estos casos, se tiene que estos ciclos son simétricos respecto al eje de oscilación de la señal. En el caso de la primera frecuencia modal, no es posible observar este ciclo. Por otra parte, no se observa claramente un ciclo anual para la componente diaria de temperatura, ya que la envolvente de esta se ve constante a través del tiempo.

Según el procedimiento explicado en la sección 5.1, se procede a calcular el desfase entre las componentes diarias de la temperatura ambiental y cada frecuencia modal. Esto se realiza tanto para las frecuencias modales (Figura 5.33, Figura 5.35 y Figura 5.37) como para las frecuencias modales invertidas (Figura 5.34, Figura 5.36 y Figura 5.38). Adicionalmente, se indica en cada gráfico los valores de desfase que corresponden a periodo de lluvia. En el cálculo del desfase, se usó la siguiente configuración:

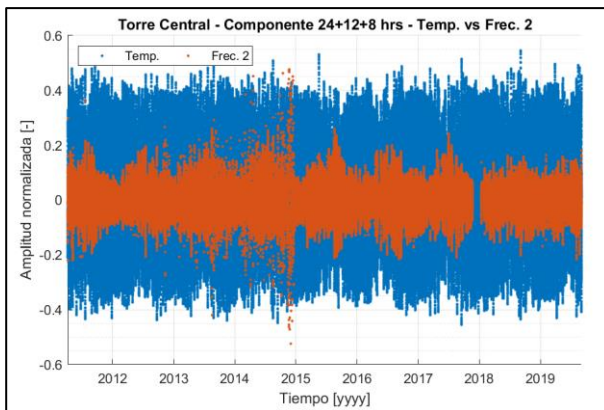
- Se utilizó ventanas de 5 días para calcular el desfase. Este valor se asignó debido a que era el que entregaba mejores resultados. A modo de ejemplo, de la Figura 5.39 a la Figura 5.42 se muestran resultados de desfase para otros largos de ventana para el caso de la primera frecuencia modal (no invertida).
- El avance entre ventanas sucesivas corresponde a 0.5 días.
- El límite de vacíos para aceptar una ventana es de un 60%. Toda ventana con mayor porcentaje de vacíos es descartada.



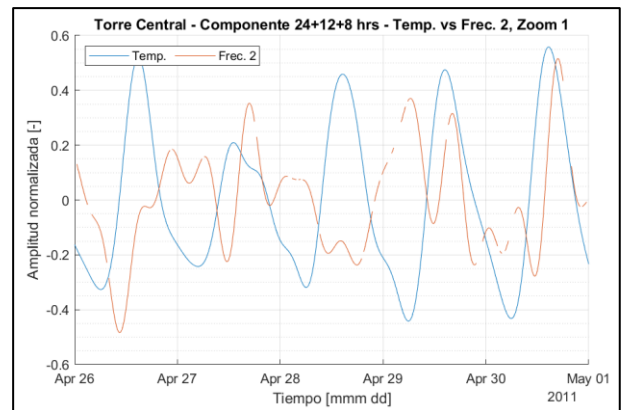
**Figura 5.27: Torre Central, comparación componente diaria de temperatura y frec. 1.**



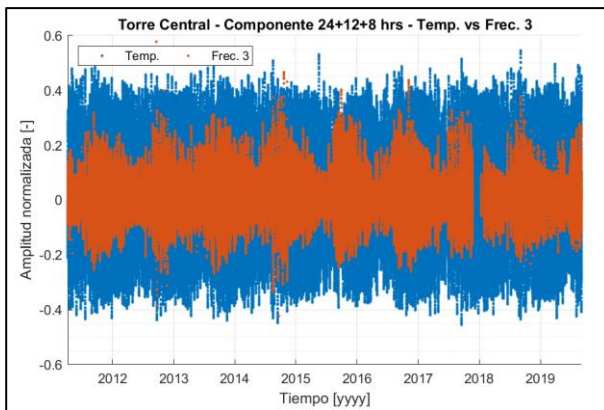
**Figura 5.28: Torre Central, componente diaria de temperatura y frec. 1, ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 16/apr/11.**



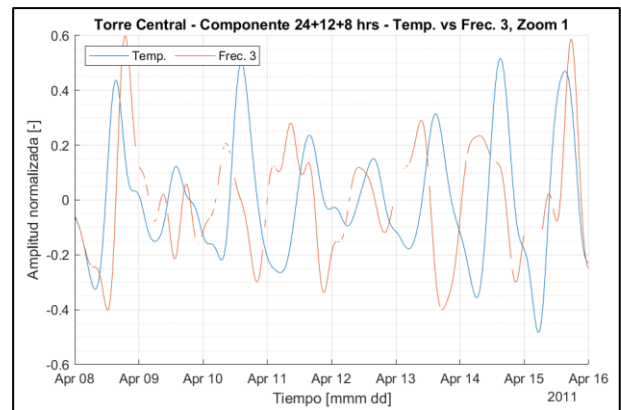
**Figura 5.29: Torre Central, comparación componente diaria de temperatura y frec. 2.**



**Figura 5.30: Torre Central, componente diaria de temperatura y frec. 2, ventana de tiempo desde 26/apr/11 hasta 01/may/11.**



**Figura 5.31: Torre Central, comparación componente diaria de temperatura y frec. 3.**



**Figura 5.32: Torre Central, componente diaria de temperatura y frec. 3, ventana de tiempo desde 08/apr/11 hasta 16/apr/11.**

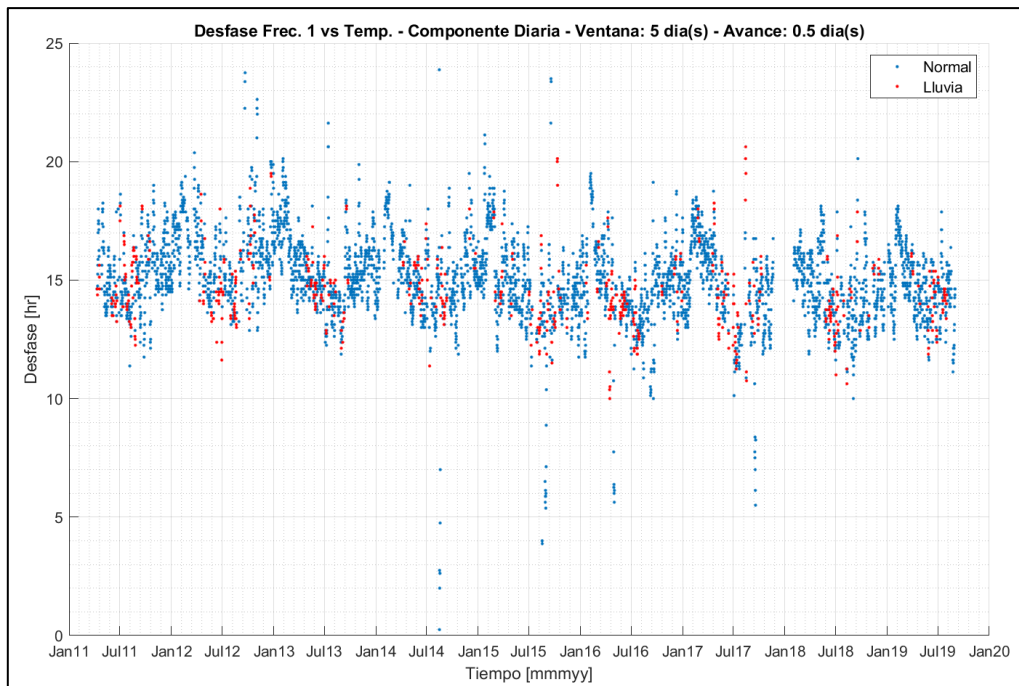


Figura 5.33: Torre Central, cálculo desfase entre componentes, temperatura y frec. modal 1.

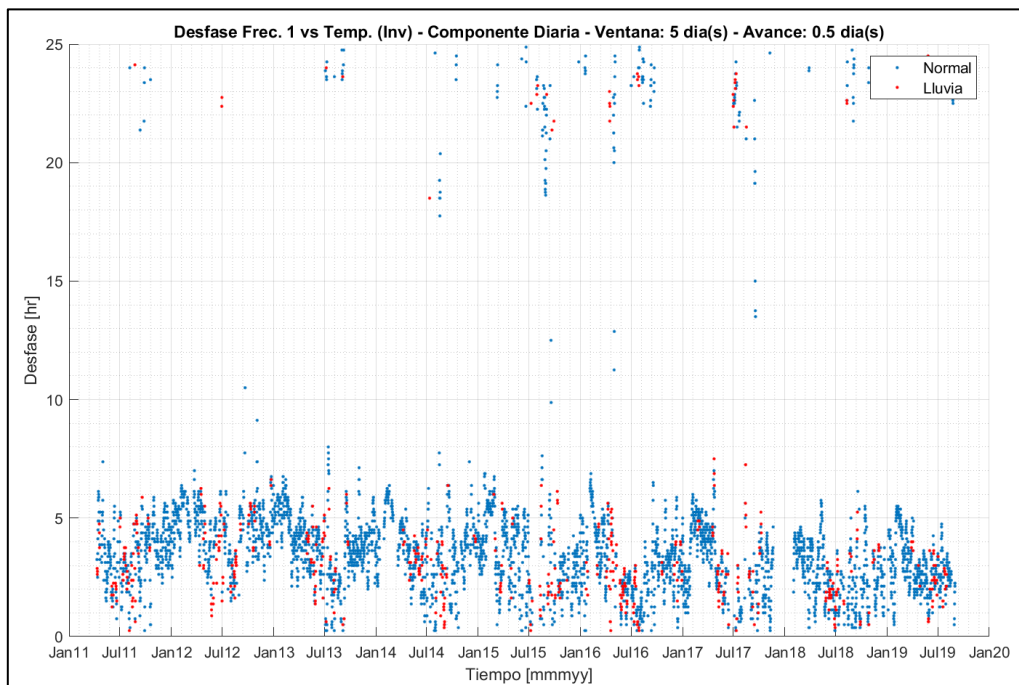


Figura 5.34: Torre Central, cálculo desfase entre componentes, temperatura y frec. modal 1. Frecuencia modal invertida.



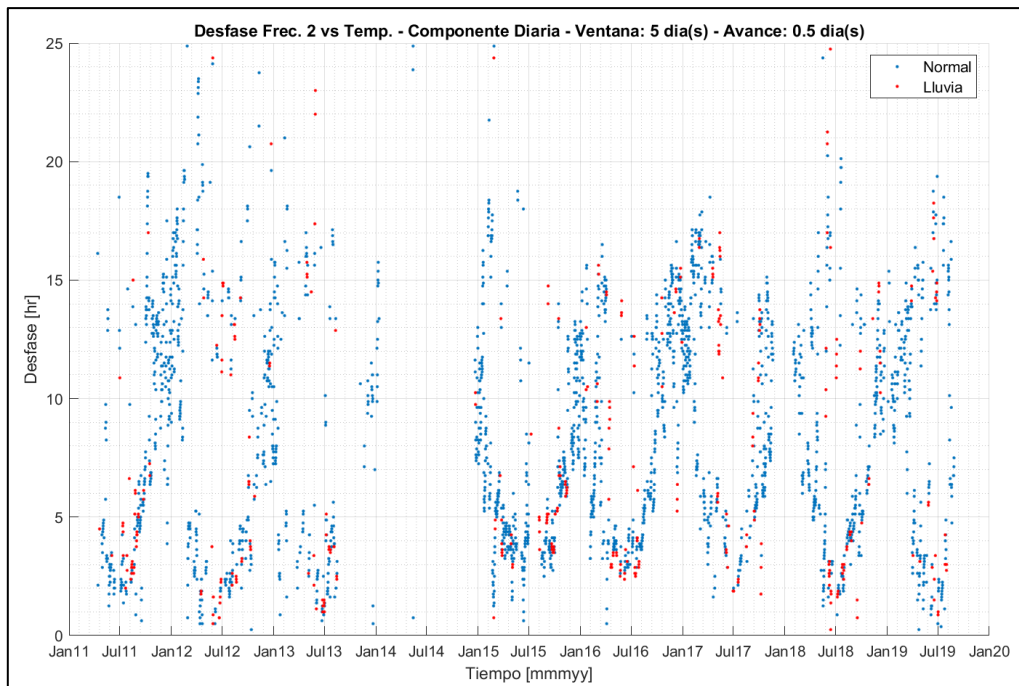


Figura 5.35: Torre Central, cálculo desfase entre componentes, temperatura y frec. modal 2.

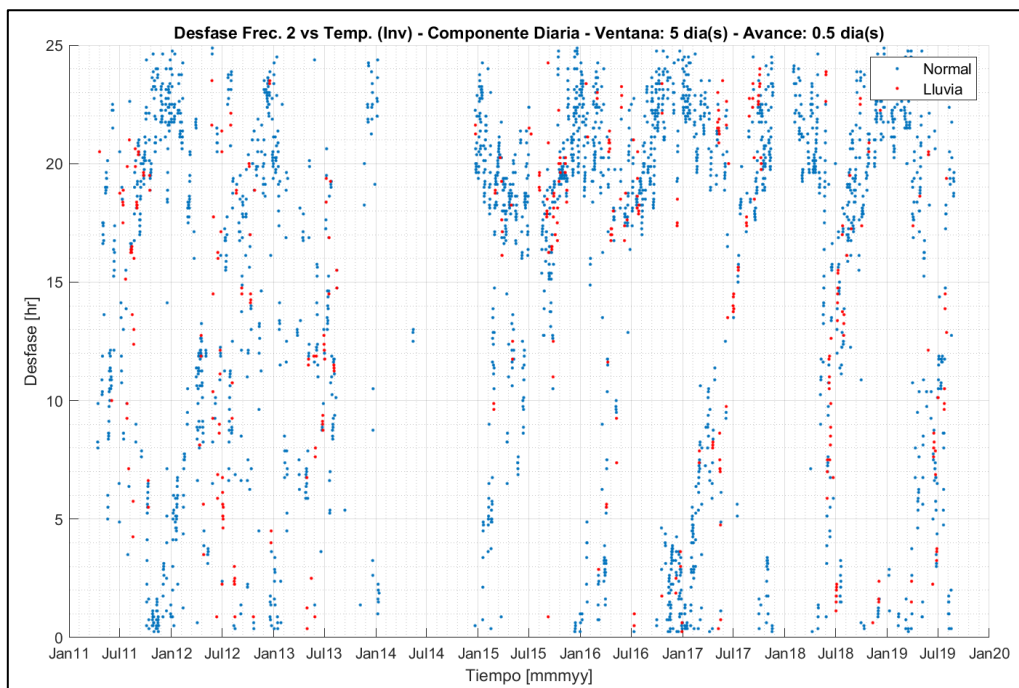


Figura 5.36: Torre Central, cálculo desfase entre componentes, temperatura y frec. modal 2. Frecuencia modal invertida.

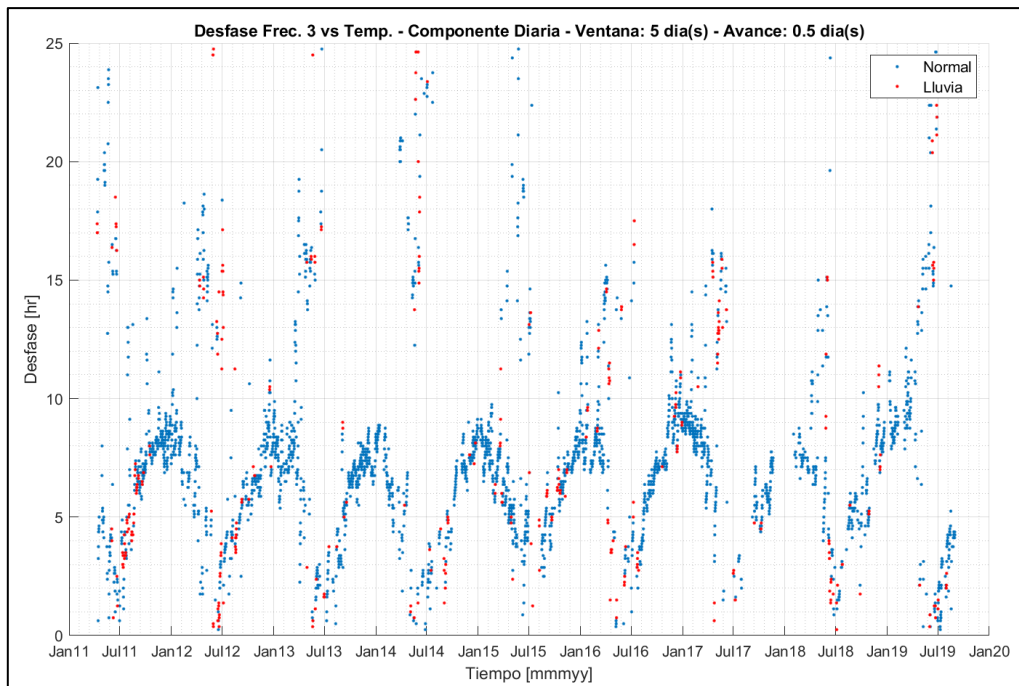


Figura 5.37: Torre Central, cálculo desfase entre componentes, temperatura y frec. modal 3.

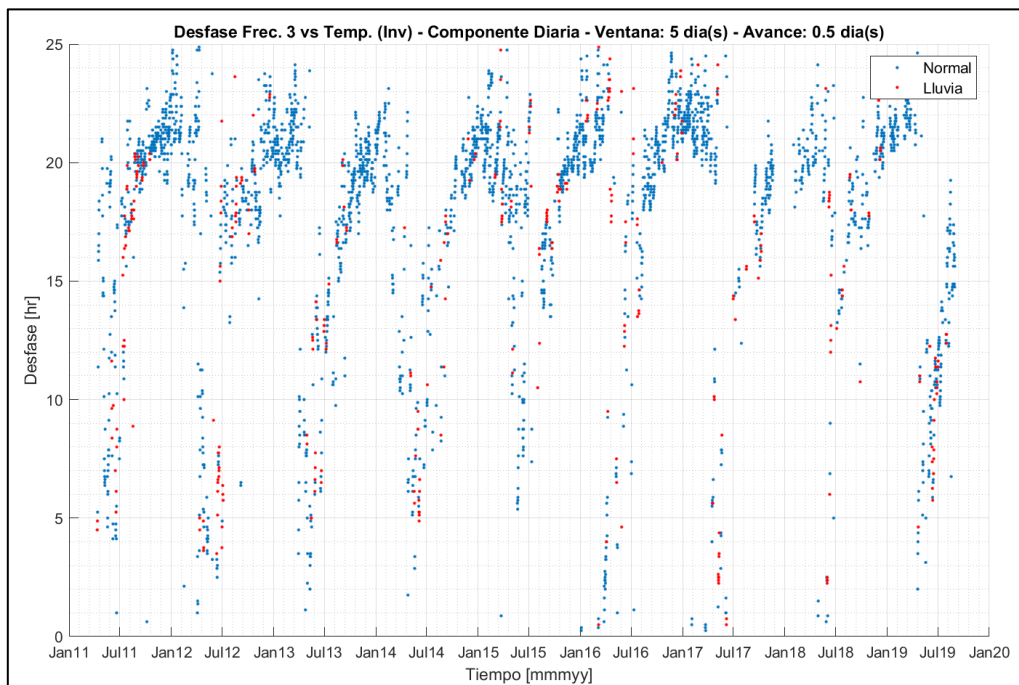
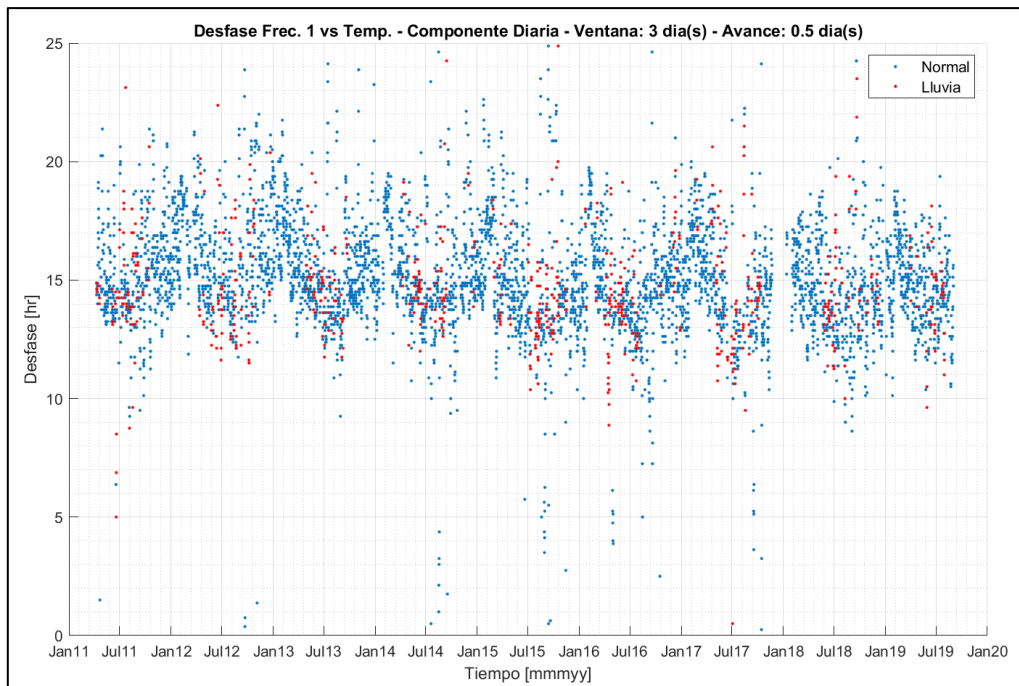
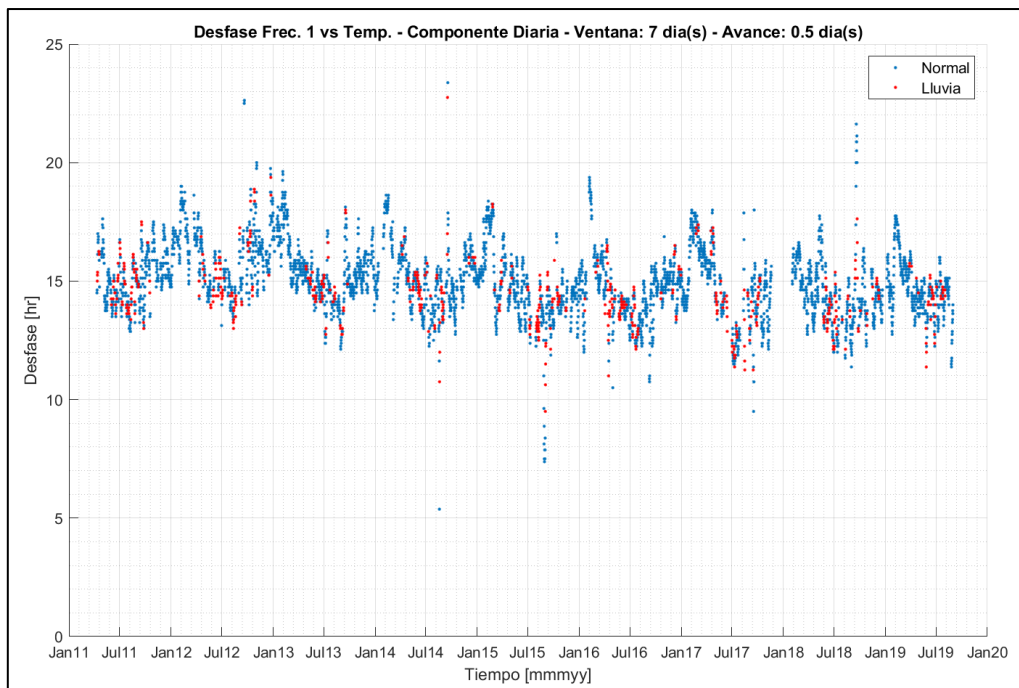


Figura 5.38: Torre Central, cálculo desfase entre componentes, temperatura y frec. modal 3. Frecuencia modal invertida.

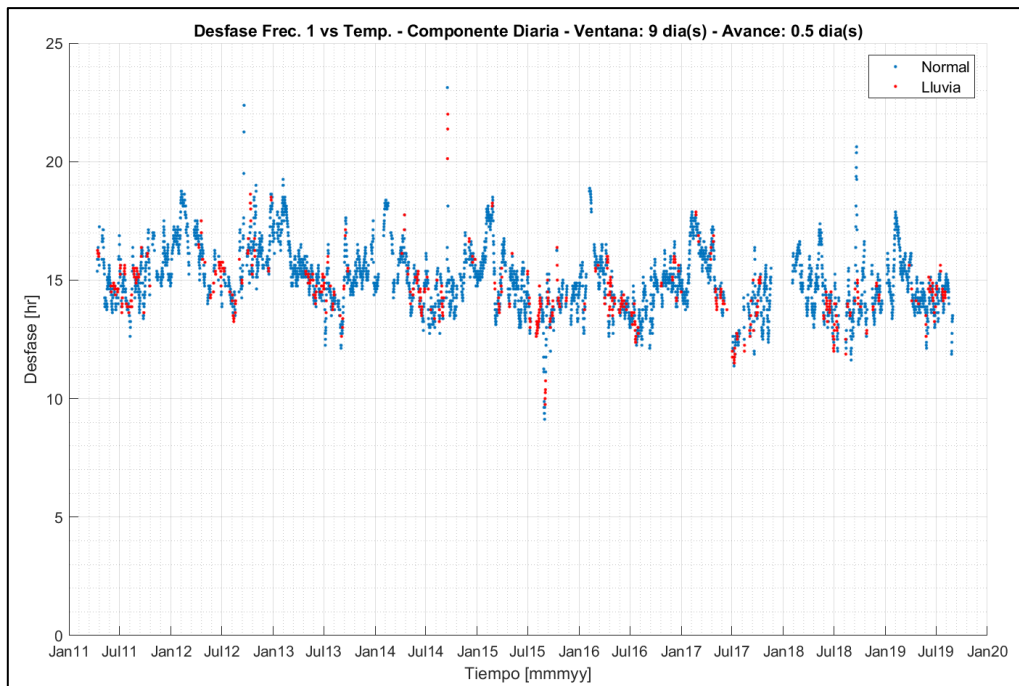


**Figura 5.39: Torre Central, cálculo desfase entre componentes, temperatura y frec. modal 1. Cálculo de desfase con ventana de 3 días.**

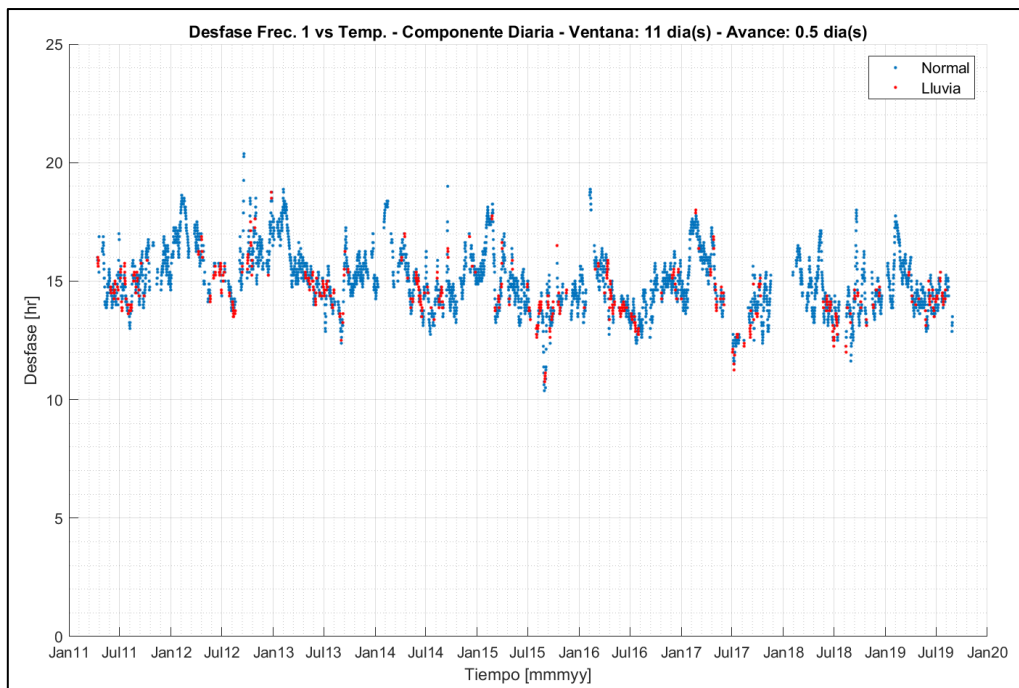


**Figura 5.40: Torre Central, cálculo desfase entre componentes, temperatura y frec. modal 1. Cálculo de desfase con ventana de 7 días.**





**Figura 5.41: Torre Central, cálculo desfase entre componentes, temperatura y frec. modal 1. Cálculo de desfase con ventana de 9 días.**



**Figura 5.42: Torre Central, cálculo desfase entre componentes, temperatura y frec. modal 1. Cálculo de desfase con ventana de 11 días.**

Para la Figura 5.33 a la Figura 5.38, se tienen los siguientes resultados:

- a) Para todas las frecuencias modales, se determina que el desfase entre temperatura y frecuencia no es constante en el tiempo. Más aún, la magnitud del desfase y la forma de variación (forma de la curva de desfase) es distinta entre frecuencias.
- b) Para todas las frecuencias modales, se identifican ciclos anuales, en los cuales se observan valores de desfase mínimos para invierno (julio), mientras que se tienen valores máximos en verano (enero). Eso confirma que el mecanismo de respuesta de la frecuencia modal ante la temperatura ambiental es diferente según la estación del año.
- c) Para una frecuencia modal específica, los resultados para la curva de desfase son diferentes dependiendo si se considera el caso de frecuencia no invertida o el caso de frecuencia invertida.
- d) Para la primera frecuencia modal, se tiene un desfase promedio de 15 horas (4 horas para el caso de frecuencia invertida), con una variación aguda tanto para invierno como verano. El desfase es mínimo en invierno, mientras que es máximo en verano.
- e) Para la segunda frecuencia modal, se observa un desfase promedio de 8 horas (20 horas para el caso de frecuencia invertida), donde el desfase es mínimo en invierno, mientras que es máximo en verano. Para el caso no invertido, se presenta una variación suave para el invierno, mientras que esta variación presenta una forma más aguda en verano.
- f) La tercera frecuencia modal tiene un desfase promedio de 8 horas (20 horas para el caso de frecuencia invertida), donde presenta un mecanismo de variación suave en verano y aguda en invierno.
- g) La amplitud de onda de cada curva de desfase es diferente entre las distintas frecuencias modales. Para una frecuencia modal específica, la amplitud de onda de la curva de desfase no es necesariamente igual entre el caso no invertido y el caso invertido.
- h) Los valores de desfase en fechas marcadas como lluvia siguen la tendencia de los datos y no destacan comparado a los datos sin presencia de lluvia. La lluvia parece no tener efecto con el mecanismo de respuesta de desfase.
- i) Se destaca la forma de la curva de desfase de la tercera frecuencia modal (tanto caso no invertido como caso invertido, Figura 5.37 y Figura 5.38), la cual presenta la misma forma que la componente estacional de las frecuencias modales (ver Figura 5.15 a Figura 5.17). La frecuencia modal 2 (no invertida) presenta la misma forma de curva, solo que invertida respecto a las componentes estacionales.

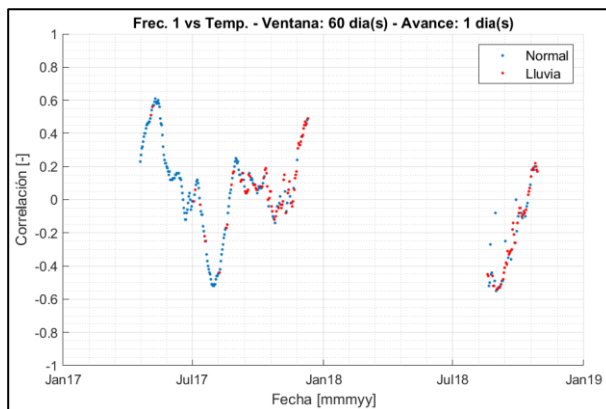
Es importante notar que algunos de los valores de desfase pueden resultar elevados, tal como el caso de la frecuencia modal 1 (no invertida), el cual presenta un desfase promedio de 15 horas, valor que se contrasta con el caso de frecuencia invertida, el cual presenta un valor de desfase promedio de 4 horas. Dado esto, surge la posibilidad de que uno de los dos casos pueda prevalecer sobre el otro. Sin embargo, para efectos de esta memoria y de simplicidad, no se comprobará esta hipótesis, donde únicamente se limitará a presentar ambos resultados (desfases para frecuencias invertidas y no invertidas), sin considerar ninguna de estas posibilidades como correcta o incorrecta.

En la sección A.5.1 de anexos se muestran los gráficos de desfase de la componente diaria de todas las frecuencias modales (caso no invertido) con respecto a la humedad absoluta. Estos resultados no resultan en curvas de desfase tan claras como el caso de temperatura ambiental, por lo que se adjuntan en esa sección. Dado que Torre Central corresponde a un edificio de hormigón, se mantiene consistente el hecho que la humedad absoluta no sea tan buen indicador como la temperatura.

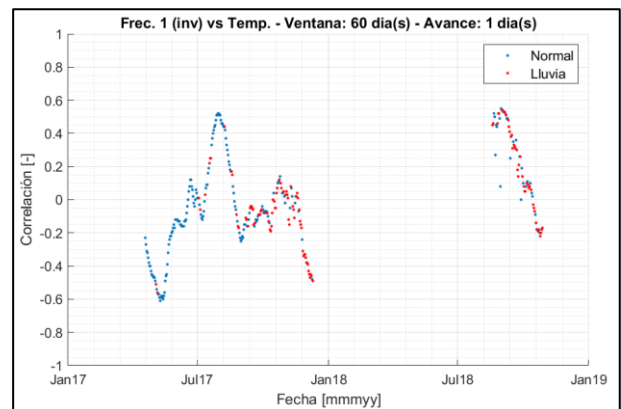
### 5.3 Iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas

#### 5.3.1 Análisis Estacional

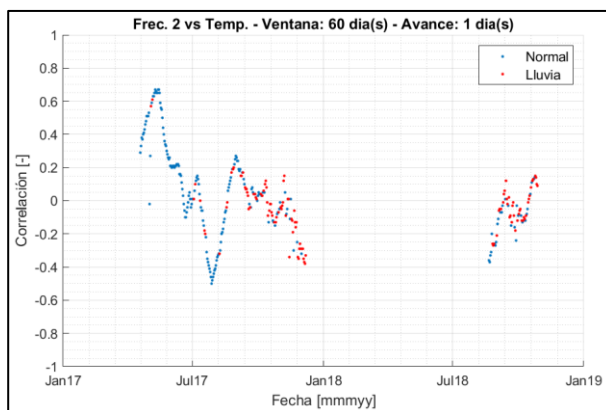
En la Figura 5.43 a la Figura 5.48 se muestra un análisis por correlación (método de ventana móvil) entre la componente estacional de la temperatura ambiental contra la componente estacional de cada frecuencia modal a analizar. Este análisis se realiza tanto para el caso de frecuencia modal invertida como no invertida. Para el caso de la iglesia de Andahuaylillas, se utilizó una ventana móvil de 60 días de largo y un avance entre ventanas de 1 día.



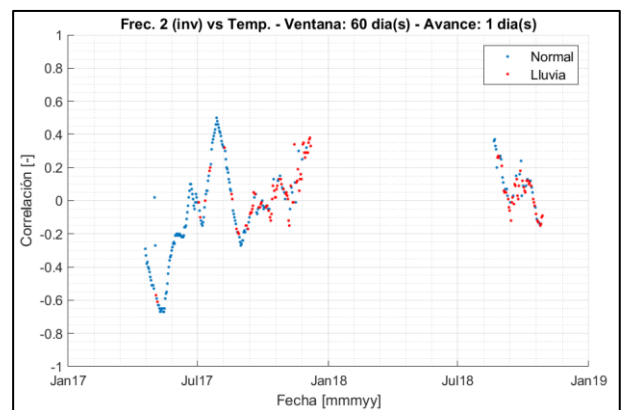
**Figura 5.43: Iglesia Andahuaylillas, análisis por correlación entre componentes estacionales de temperatura y frec. modal 1.**



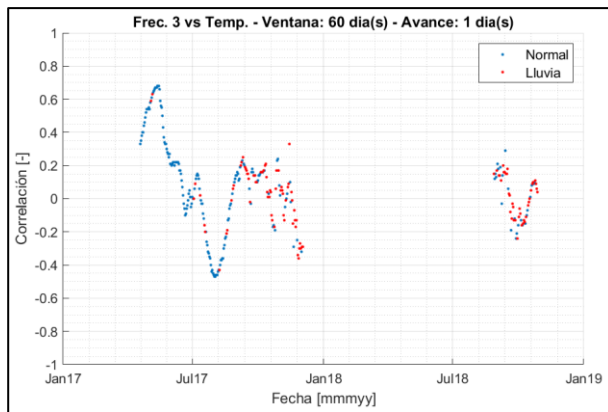
**Figura 5.44: Iglesia Andahuaylillas, análisis por correlación entre comp. estacionales de temp. y frec. modal 1 (invertida).**



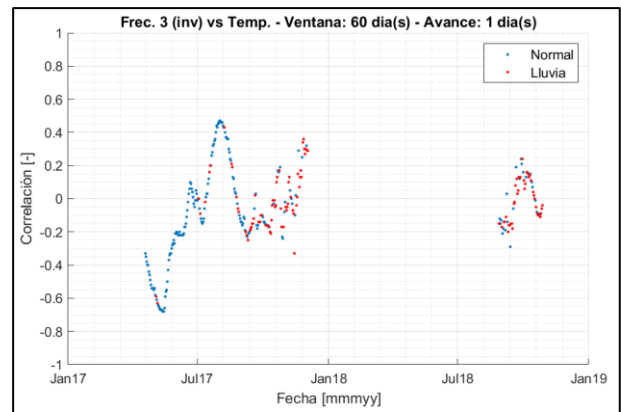
**Figura 5.45: Iglesia Andahuaylillas, análisis por correlación entre componentes estacionales de temperatura y frec. modal 2.**



**Figura 5.46: Iglesia Andahuaylillas, análisis por correlación entre comp. estacionales de temp. y frec. modal 2 (invertida).**



**Figura 5.47: Iglesia Andahuaylillas, análisis por correlación entre componentes estacionales de temperatura y frec. modal 3.**



**Figura 5.48: Iglesia Andahuaylillas, análisis por correlación entre comp. estacionales de temp. y frec. modal 3 (invertida).**

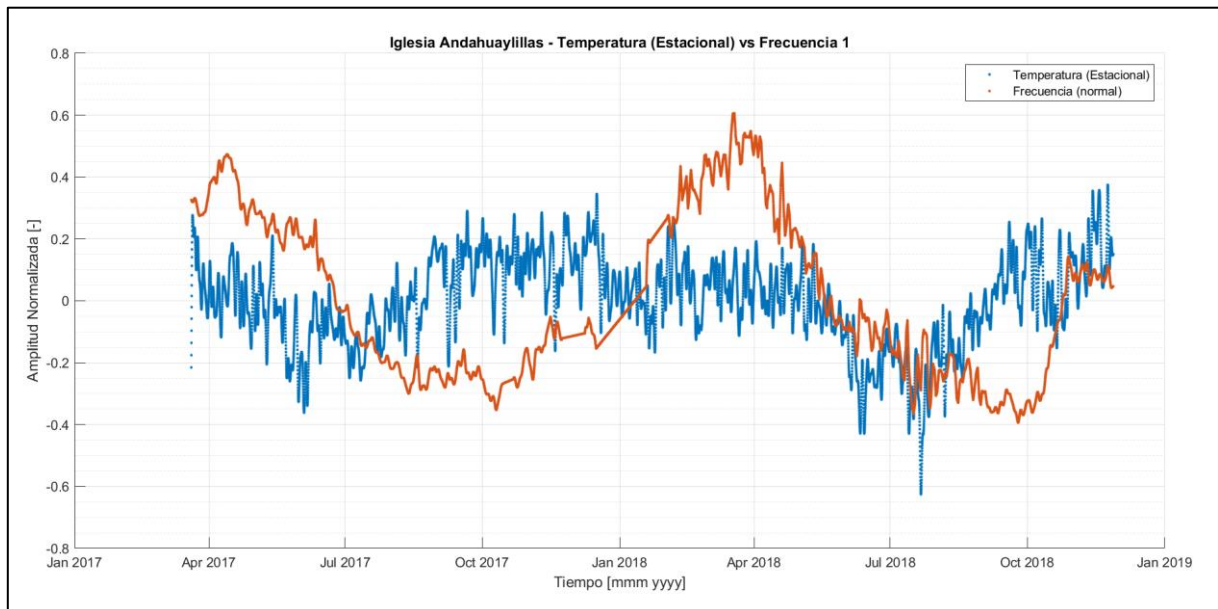
De los resultados del análisis de correlación, se identifica que la mayoría de los datos corresponden correlaciones débiles (cerca de cero) tanto para la frecuencia como para la frecuencia invertida. Se observa una gran dispersión de datos cerca de Julio de 2017, que arroja tanto correlaciones positivas como negativas, por lo que no se sigue una tendencia clara en este intervalo. Existe un vacío de datos de correlación para el primer semestre de 2018, lo que es debido a los vacíos de data en los registros de las frecuencias modales de la estructura. Finalmente, dado todo esto, no es directo determinar por este método si la frecuencia de esta estructura es proporcional o inversamente proporcional a la temperatura ambiental.

En la Figura 5.49 a la Figura 5.51 se muestra la comparación entre la componente estacional de temperatura ambiental contra la componente estacional de cada frecuencia modal a analizar. Para realizar la comparación, se normalizó la amplitud de ambas señales. Contrario al caso anterior, las componentes estacionales de cada frecuencia modal no fueron invertidas, debido a que el análisis por correlación no favoreció ningún comportamiento específico entre ambas variables (proporcional o inverso). Adicionalmente, se realizó una interpolación a los datos faltantes de cada componente de frecuencia modal, esto con el fin de generar una mejor visualización de los datos. Dado que se busca comparar los datos a una escala anual, una interpolación no afectará a la calidad y forma de la señal.

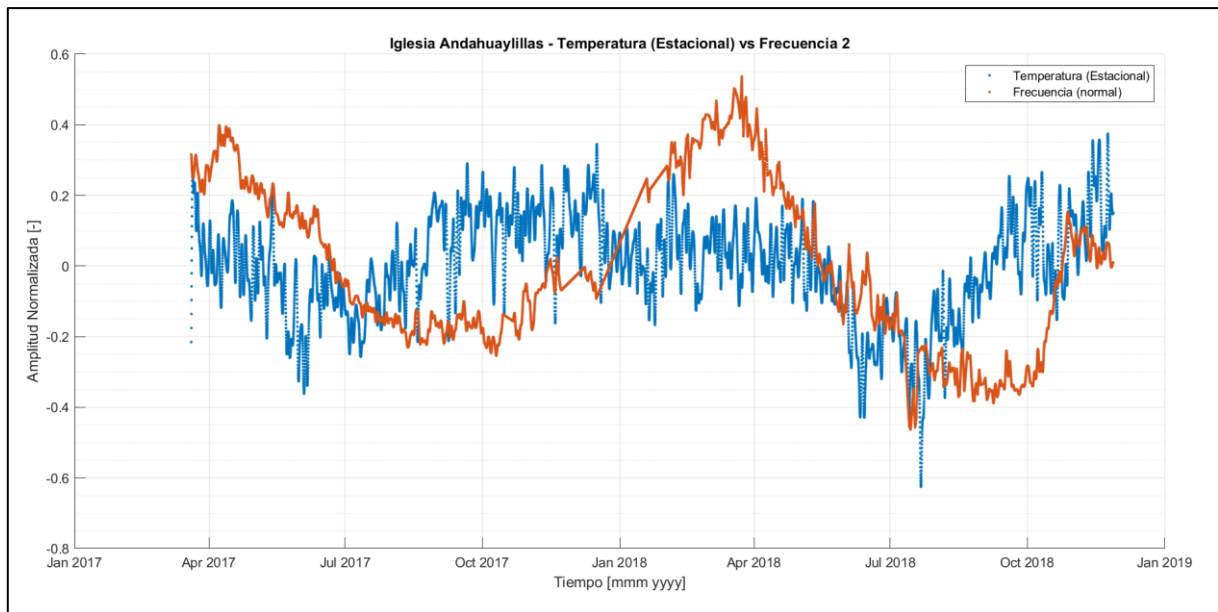
A partir de estas figuras, se realizan las siguientes observaciones:

- a) La correlación entre datos no es clara. La componente de frecuencia modal no necesariamente sigue la misma tendencia que la componente de temperatura ambiental. Para las frecuencias modales, se observa un comportamiento agudo cercano al mes de abril, presentando los valores máximos, mientras que para el mes de octubre se observa un comportamiento suave y con valores mínimos. Para el caso de la temperatura ambiental, esta mantiene un comportamiento suave tanto para sus valores estacionales máximos y mínimos.

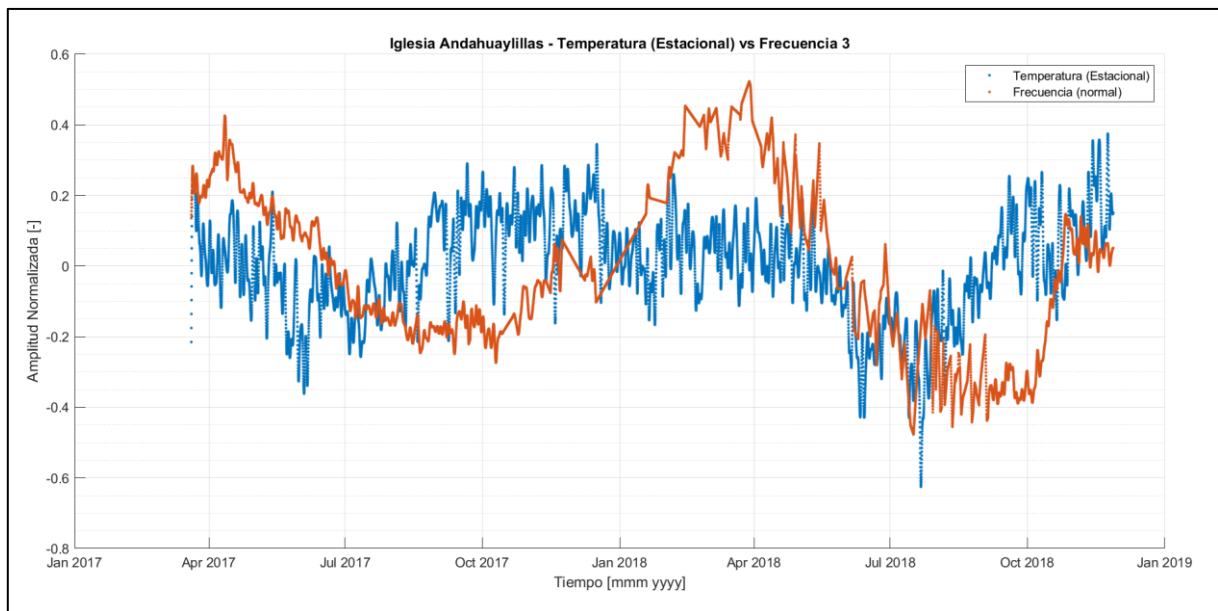
- b) Se observa un desfase entre frecuencias modales y temperatura ambiental alto, promediando los 2 meses de desfase. Este desfase es común entre todas las frecuencias modales.
- c) Para todas las frecuencias modales, se observa un mecanismo proporcional a la temperatura ambiental. En el caso que se asuma un comportamiento inversamente proporcional, generaría que ambas señales presenten un desfase mayor a 6 meses, lo que es poco probable.
- d) Se mantiene consistente el hecho que para una estructura de albañilería de abobe la temperatura ambiental en forma aislada de la humedad no sea tan buen indicador.



**Figura 5.49: Iglesia Andahuaylillas, comparación temperatura ambiental vs frecuencia modal 1 (componentes estacionales).**



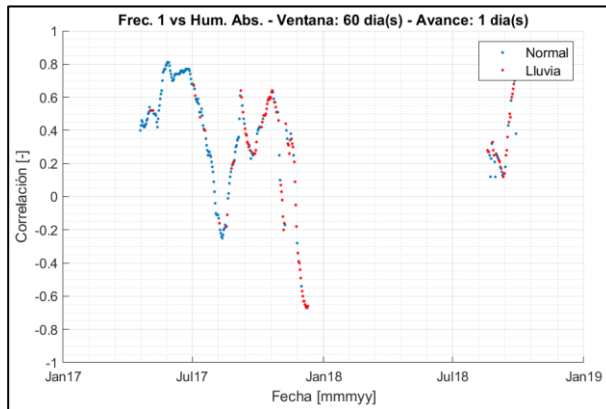
**Figura 5.50: Iglesia Andahuaylillas, comparación temperatura ambiental vs frecuencia modal 2 (componentes estacionales).**



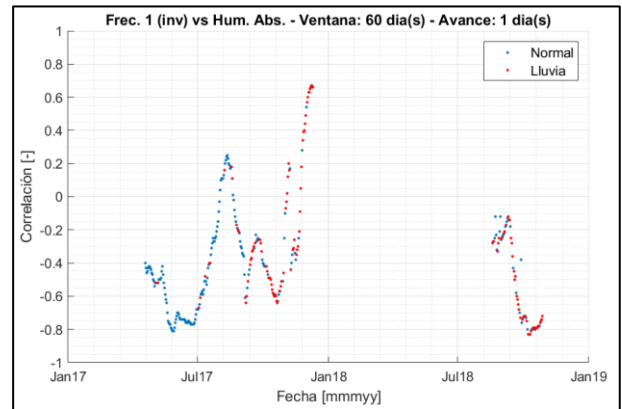
**Figura 5.51: Iglesia Andahuaylillas, comparación temperatura ambiental vs frecuencia modal 3 (componentes estacionales).**

A continuación, se realiza un análisis por correlación entre la componente estacional de la humedad absoluta y de cada frecuencia a analizar. En la Figura 5.52 a la Figura 5.57 se muestran los resultados de este análisis, tanto para el caso de frecuencia modal invertida como no invertida. De estos resultados se tienen correlaciones mayormente positivas para el caso de frecuencia modal no invertida, que indican mediana correlación (entre 0.1 a 0.5). En particular, se observa una disminución importante para datos cercanos a Julio de 2017, la cual puede deberse al desfase presente entre

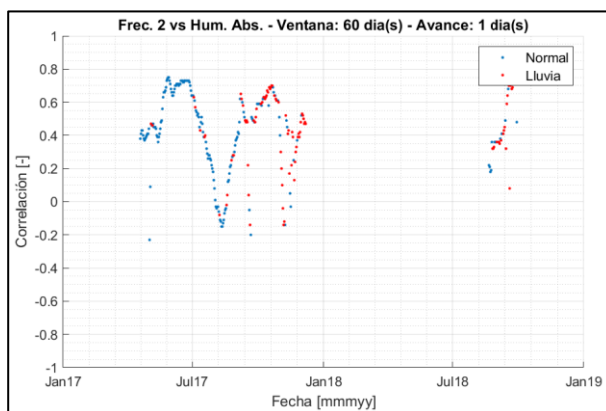
humedad absoluta y frecuencia modal (esto se verá en detalle a continuación, en la comparación grafica de componentes estacionales). Se tiene que las correlaciones entre frecuencia modal y humedad absoluta son más fuertes que el caso de frecuencia modal y temperatura.



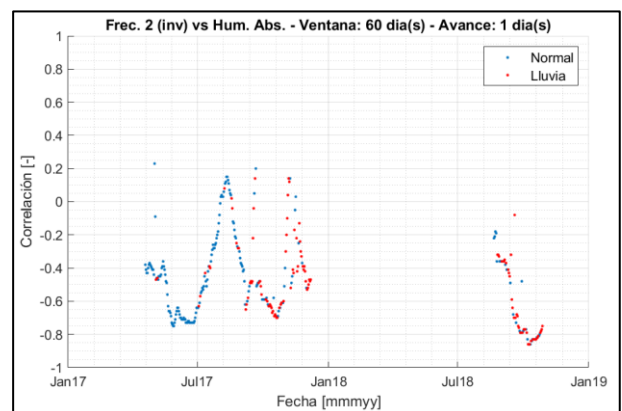
**Figura 5.52: Iglesia Andahuaylillas, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad abs. y frec. modal 1.**



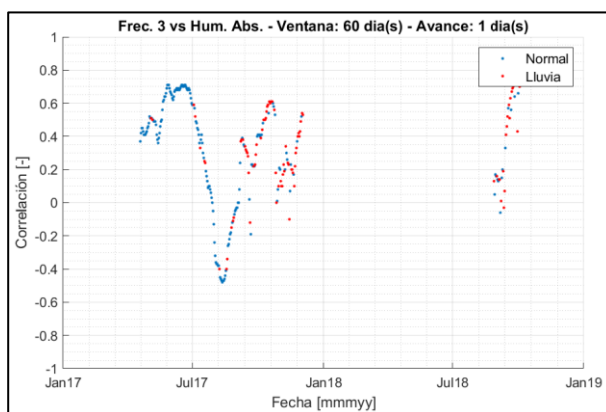
**Figura 5.53: Iglesia Andahuaylillas, análisis por correlación entre comp. estacionales de humedad abs. y frec. modal 1 (invertida).**



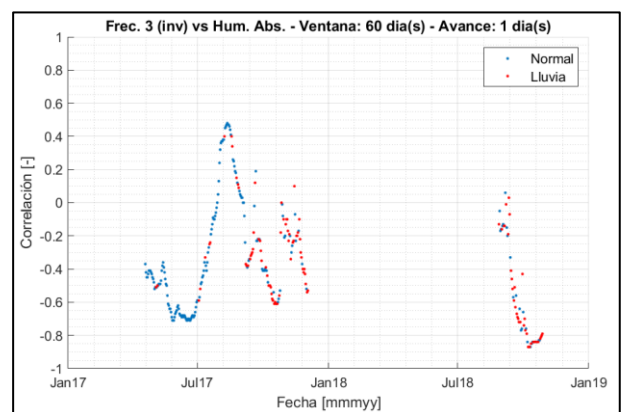
**Figura 5.54: Iglesia Andahuaylillas, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad abs. y frec. modal 2.**



**Figura 5.55: Iglesia Andahuaylillas, análisis por correlación entre comp. estacionales de humedad abs. y frec. modal 2 (invertida).**



**Figura 5.56: Iglesia Andahuaylillas, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad abs. y frec. modal 3.**



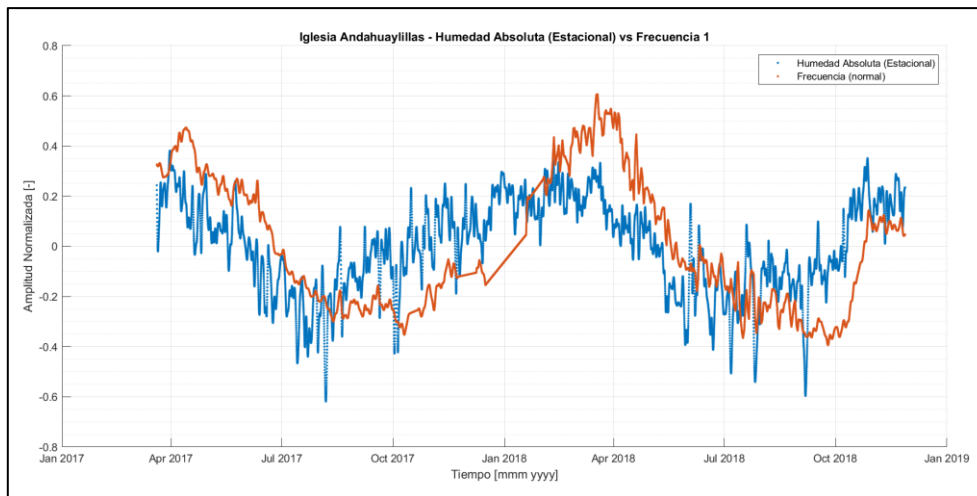
**Figura 5.57: Iglesia Andahuaylillas, análisis por correlación entre comp. estacionales de humedad abs. y frec. modal 3 (invertida).**



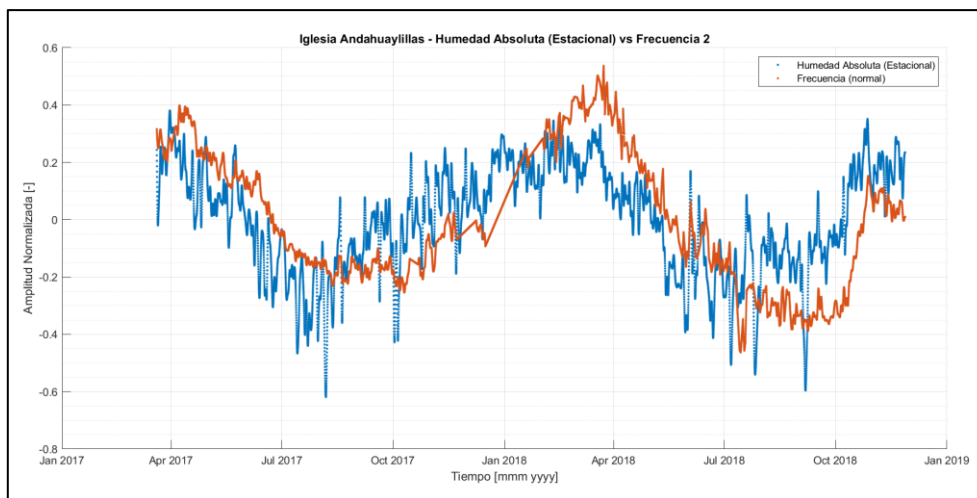
A continuación, se presenta el mismo análisis, ahora comparando la señal de humedad absoluta contra cada frecuencia modal (componentes estacionales). Los resultados se presentan en la Figura 5.58 a la Figura 5.60. Nuevamente, las señales fueron normalizadas, interpoladas (para el caso de las frecuencias modales) y no se procedió a invertir las señales de frecuencia modal. De estos resultados, se hacen las siguientes observaciones:

- a) Para el caso de esta estructura, se observa un desfase promedio de 1.5 meses entre la componente estacional de humedad absoluta y frecuencia.
- b) Al comparar el desfase entre máximos y mínimos locales, se tiene que el desfase no necesariamente es constante en todo el periodo de tiempo analizado. Pareciera ser que los mínimos de humedad (julio 2017 y 2018) generan mayor desfase a la componente de frecuencia modal que el máximo de humedad (febrero 2018). Sin embargo, a falta de más datos que comprueben esto, este hecho no se asegura.
- c) Para todas las frecuencias modales, se tiene un comportamiento proporcional a la humedad absoluta. Esto concuerda con los resultados del análisis por correlación. En el caso hipotético que se asuma un comportamiento inversamente proporcional para las frecuencias modales, se obtendría un desfase mayor a 6 meses entre la componente de humedad y frecuencia, lo que es poco probable.
- d) Se observa que las 3 frecuencias modales analizadas presentan la misma fase y mecanismo de respuesta entre sí. El mecanismo de respuesta asigna un comportamiento más suave cercanos a mínimos de humedad en invierno, mientras que asigna un comportamiento más agudo cercano a máximos de humedad en verano. Para este edificio, el mecanismo de respuesta de la frecuencia modal ante cambios de humedad absoluta es distinto según la estacionalidad.
- e) El mecanismo de respuesta observado de la componente estacional de las frecuencias modales es el mismo que se observó para el caso de Torre Central, presentando máximos agudos y mínimos suaves (o mínimos agudos y máximos suaves para el caso de frecuencia modal invertida).
- f) Los datos de transición entre máximos y mínimos estacionales presentan aproximadamente la misma pendiente entre ambas señales.
- g) Para la componente de humedad absoluta, se observa que la señal presenta un comportamiento suave tanto en invierno como en verano.

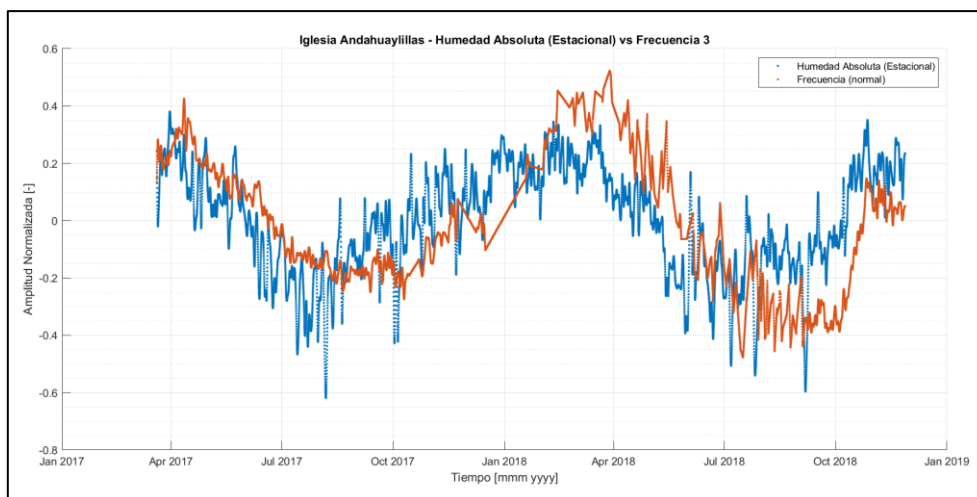




**Figura 5.58: Iglesia Andahuaylillas, comparación humedad absoluta vs frecuencia modal 1 (componentes estacionales).**



**Figura 5.59: Iglesia Andahuaylillas, comparación humedad absoluta vs frecuencia modal 2 (componentes estacionales).**



**Figura 5.60: Iglesia Andahuaylillas, comparación humedad absoluta vs frecuencia modal 3 (componentes estacionales).**

Para esta estructura (estructura de albañilería de adobe), se acepta que la humedad absoluta sea un mejor indicador que la temperatura para analizar la variación de las frecuencias modales de la estructura. Esto se refuerza tanto mediante la comparación directa entre ambas componentes estacionales de humedad absoluta y frecuencia modal, así como mediante los resultados del análisis por correlación de ambas variables. Sin embargo, el desfase entre la componente estacional de humedad y frecuencia sigue siendo elevado (magnitud promedio de 1.5 meses). Una posible explicación de la magnitud del desfase es la estructuración presente en la iglesia. Dado que sus muros son de extensas dimensiones, presentando espesores entre 1.1 a 2.0 metros y alturas entre 10 y 12 metros, es probable que estos sean los responsables del desfase entre la señal ambiental y la respuesta de las frecuencias modales. Al ser de gran tamaño, la transferencia de calor y humedad entre el medio ambiente y el material mismo de la estructura va a ser lenta, por lo que la respuesta modal también va a ser lenta, ya que la respuesta modal depende de la distribución y magnitud de la temperatura y humedad en el mismo material. Por otro lado, el hecho que los muros estén construidos con albañilería de adobe, material con gran inercia térmica, también incide en la magnitud del desfase observado.

### 5.3.2 Análisis Diario

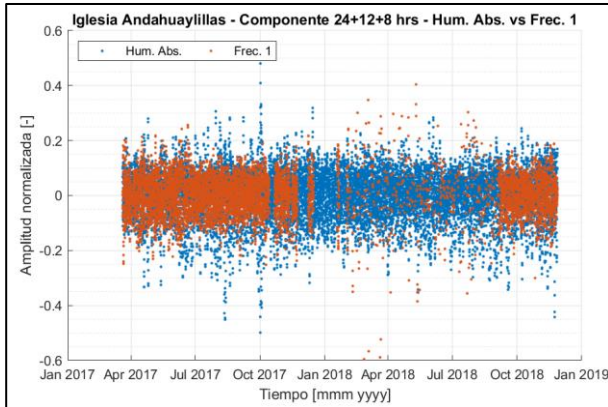
En la Figura 5.61 a la Figura 5.66 se muestra una comparación directa entre la componente diaria de la humedad absoluta contra la componente diaria de cada frecuencia modal a analizar. Se muestra tanto una comparación a escala anual como una comparación con un acercamiento diario. Para efectos de esta comparación, no se procedió a invertir ninguna frecuencia modal al ser comparada con la humedad absoluta; esto con el fin de poder observar el comportamiento del ciclo diario sin asumir previamente ningún tipo de comportamiento.

De estas figuras se tienen los siguientes resultados:

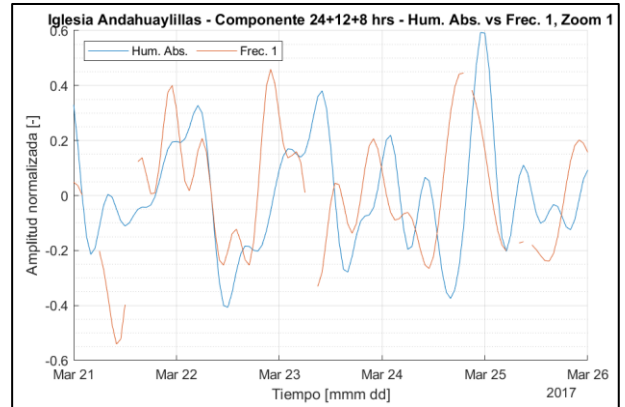
- a) Al realizar un acercamiento diario, se tiene que la componente de humedad y de frecuencia modal no se encuentran en fase. Esto indica que la respuesta de la frecuencia modal ante cambios de humedad absoluta no es inmediata.
- b) No es directo identificar si el ciclo diario de la frecuencia modal presenta un comportamiento inversamente proporcional o no respecto al ciclo diario de la humedad absoluta.
- c) Al realizar la comparación con un rango anual (Figura 5.61, Figura 5.63 y Figura 5.65), no es posible observar algún tipo de correlación entre ambas señales. Esto es en parte debido al porcentaje importante de valores vacíos en la data modal.

Dado los altos porcentajes de valores vacíos en las señales de frecuencia modal, no es posible realizar mayores conclusiones a nivel diario. Debido al mismo motivo, no fue posible generar resultados de la variación del desfase entre la señal ambiental y señal modal (componentes diarias).

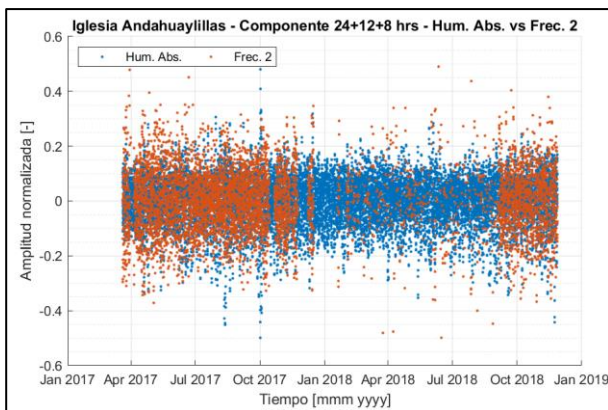
En la sección A.5.2 de Anexos se muestra una comparación directa entre la componente diaria de la temperatura ambiental contra la componente diaria de cada frecuencia modal a analizar.



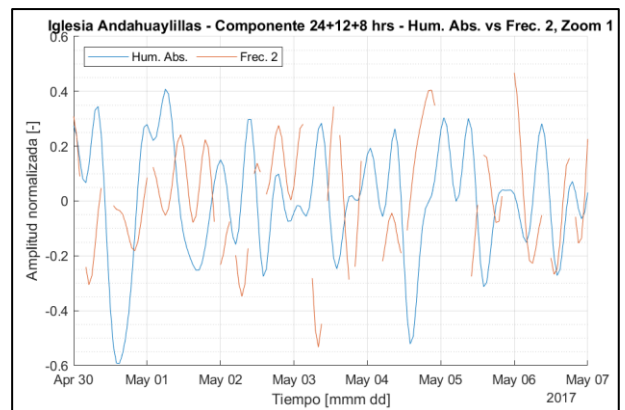
**Figura 5.61: Iglesia Andahuaylillas, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 1.**



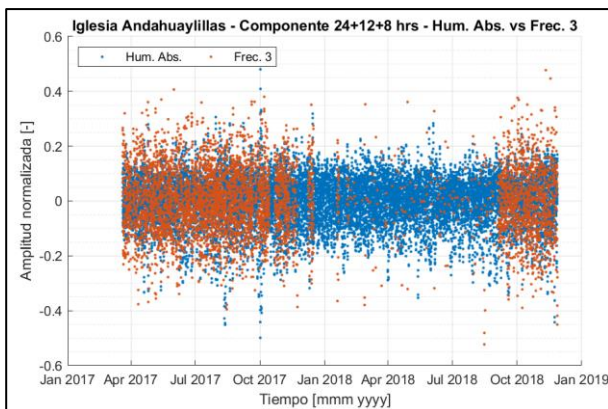
**Figura 5.62: Iglesia Andahuaylillas, comp. diaria de humedad abs. y frec. 1, ventana de tiempo desde 21/mar/17 hasta 26/mar/17.**



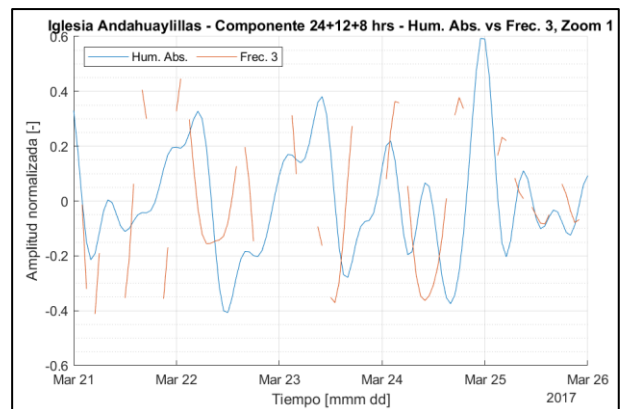
**Figura 5.63: Iglesia Andahuaylillas, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 2.**



**Figura 5.64: Iglesia Andahuaylillas, comp. diaria de humedad abs. y frec. 2, ventana de tiempo desde 30/apr/17 hasta 07/may/17.**



**Figura 5.65: Iglesia Andahuaylillas, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 3.**

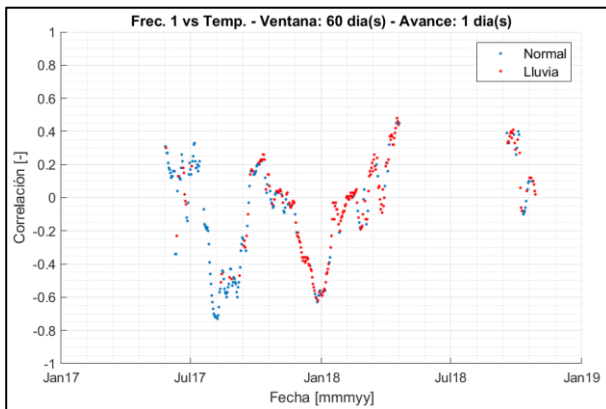


**Figura 5.66: Iglesia Andahuaylillas, comp. diaria de humedad abs. y frec. 3, ventana de tiempo desde 21/mar/17 hasta 26/mar/17.**

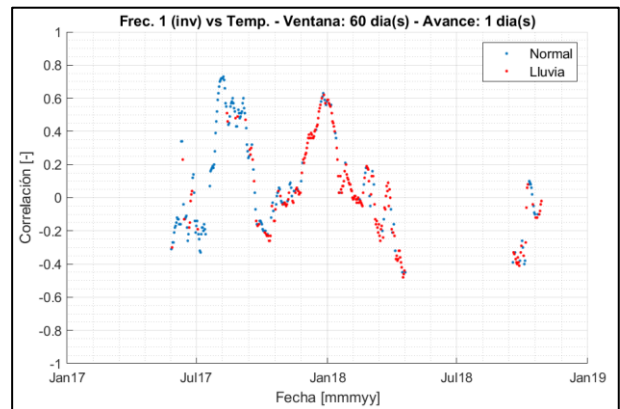
## 5.4 Iglesia de San Juan Bautista de Huaro

### 5.4.1. Análisis Estacional

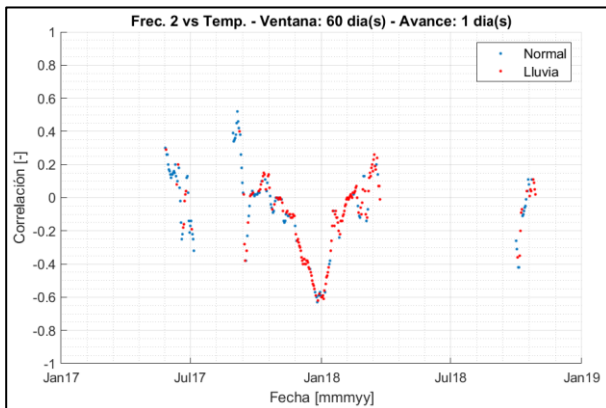
A continuación, se realiza un análisis por correlación entre la componente estacional de la temperatura ambiental y de cada frecuencia a analizar. En la Figura 5.67 a la Figura 5.72 se muestran los resultados de este análisis, tanto para el caso de frecuencia modal invertida como no invertida. Para el caso de la iglesia de Huaro, se utilizó una ventana móvil de 60 días de largo y un avance entre ventanas de 1 día.



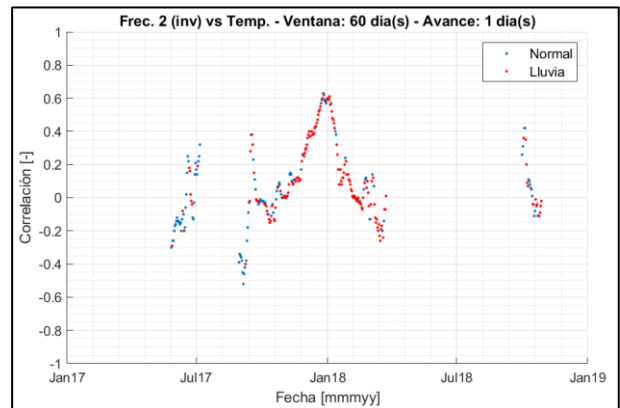
**Figura 5.67: Iglesia de Huaro, análisis por correlación entre componentes estacionales de temperatura y frec. modal 1.**



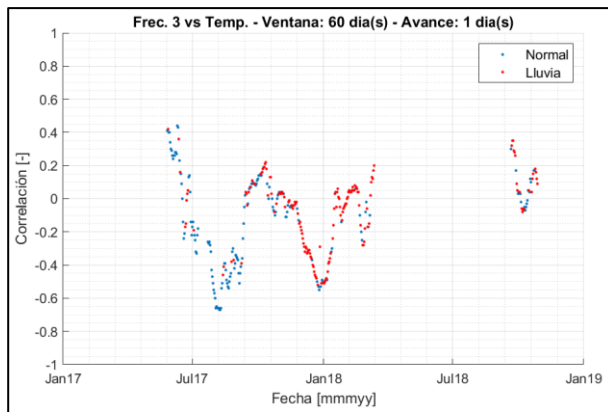
**Figura 5.68: Iglesia de Huaro, análisis por correlación entre componentes estacionales de temp. y frec. modal 1 (invertida).**



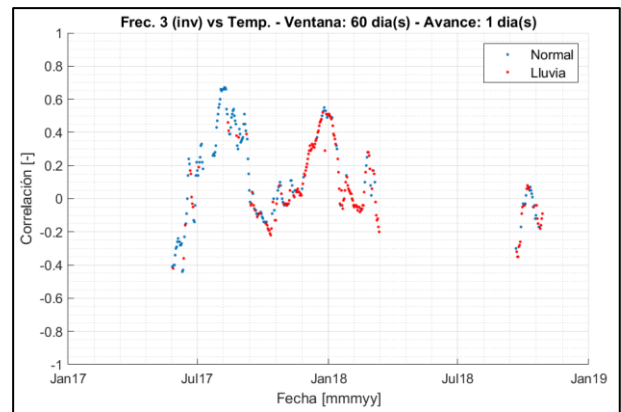
**Figura 5.69: Iglesia de Huaro, análisis por correlación entre componentes estacionales de temperatura y frec. modal 2.**



**Figura 5.70: Iglesia de Huaro, análisis por correlación entre componentes estacionales de temp. y frec. modal 2 (invertida).**



**Figura 5.71: Iglesia de Huaró, análisis por correlación entre componentes estacionales de temperatura y frec. modal 3.**



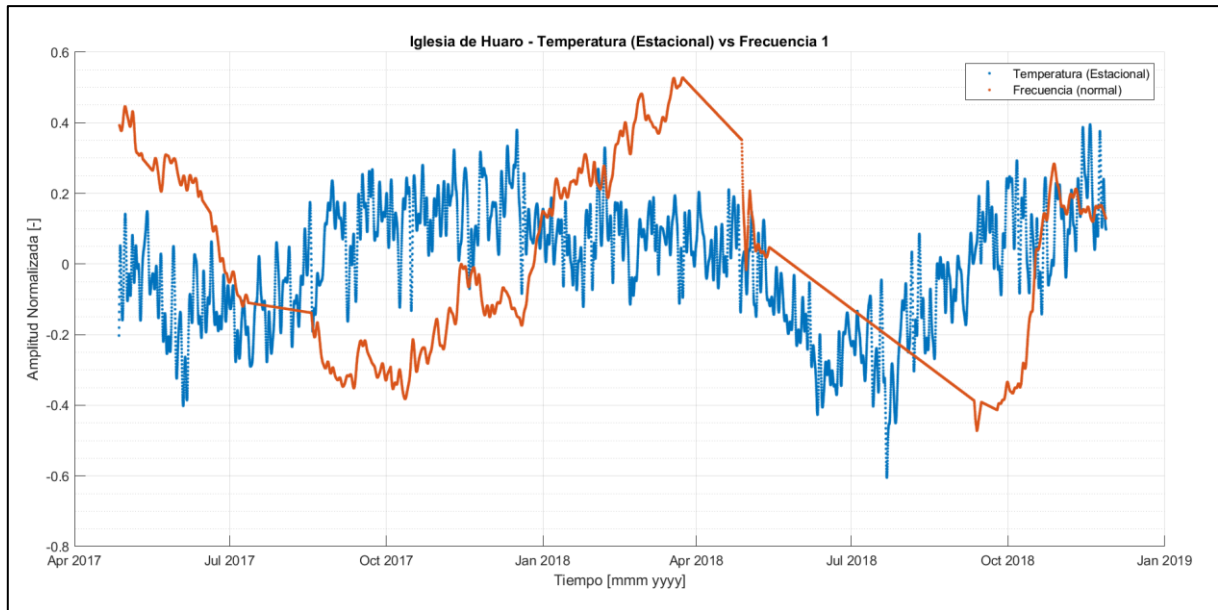
**Figura 5.72: Iglesia de Huaró, análisis por correlación entre componentes estacionales de temp. y frec. modal 3 (invertida).**

De estos resultados, se observa que, para estas dos variables, no existe una correlación clara a través del tiempo (tanto para el caso de frecuencia invertida como no invertida). Se tiene que la mayoría de los datos corresponden correlaciones débiles (cercanas a cero). Existe un vacío de datos de correlación para el primer semestre de 2018, lo que es debido a los vacíos de data en los registros de las frecuencias modales de la estructura. Finalmente, dado todo esto, no es directo determinar por este método si la frecuencia de esta estructura es proporcional o inversamente proporcional a la temperatura ambiental.

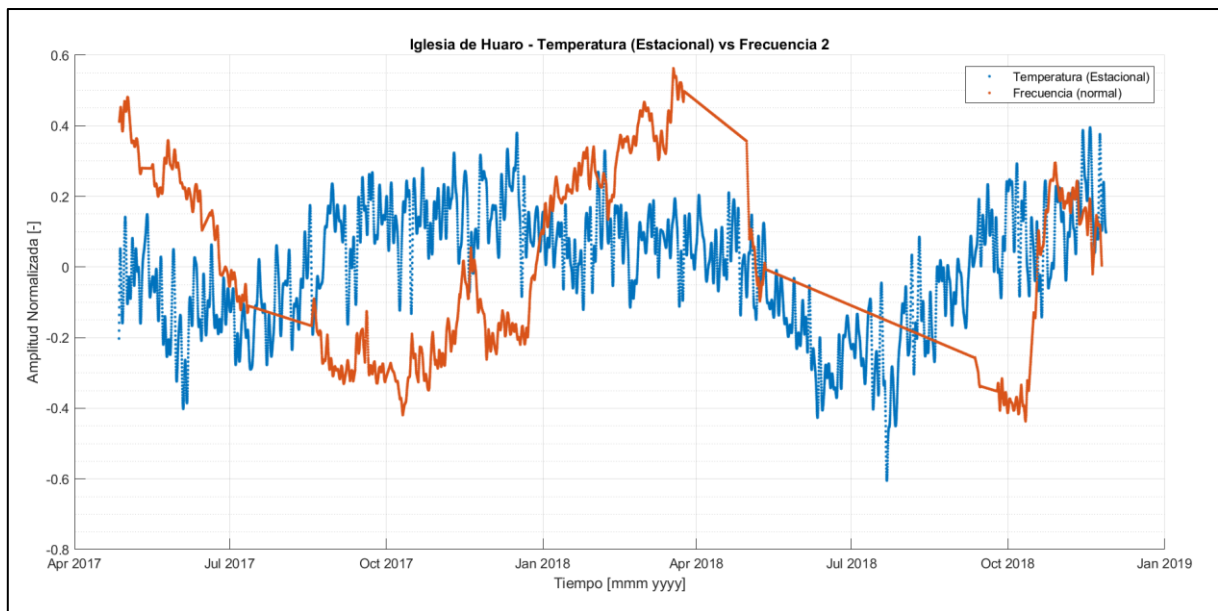
En la Figura 5.73 a la Figura 5.75 se muestra una comparación directa entre la componente estacional de temperatura ambiental contra la componente estacional de cada frecuencia modal a analizar. Para realizar la comparación, se normalizó la amplitud de ambas señales. Al igual que el caso anterior, las componentes estacionales de cada frecuencia modal no fueron invertidas, debido a que el análisis por correlación no favoreció ningún comportamiento específico entre ambas variables (proporcional o inverso). Adicionalmente, se realizó una interpolación a los datos faltantes de cada componente de frecuencia modal. De estos resultados, se hacen las siguientes observaciones:

- a) La correlación entre datos no es clara. La componente de frecuencia modal no necesariamente sigue la misma tendencia que la componente de temperatura ambiental. Se observa nuevamente que la frecuencia modal presenta un comportamiento agudo en los máximos y suave en los mínimos, mientras que la temperatura sigue un comportamiento suave tanto en máximos como en mínimos.
- b) Se observa un desfase entre frecuencias modales y temperatura ambiental alto, promediando los 3 meses de desfase. Este desfase es común entre todas las frecuencias modales.
- c) Para todas las frecuencias modales, se observa un mecanismo proporcional a la temperatura ambiental. En el caso que se asuma un comportamiento inversamente proporcional, generaría que ambas señales presenten un desfase mayor a 6 meses, lo que es poco probable.

d) Se mantiene consistente el hecho que para una estructura de albañilería de abobe la temperatura ambiental en forma aislada de la humedad no sea tan buen indicador.

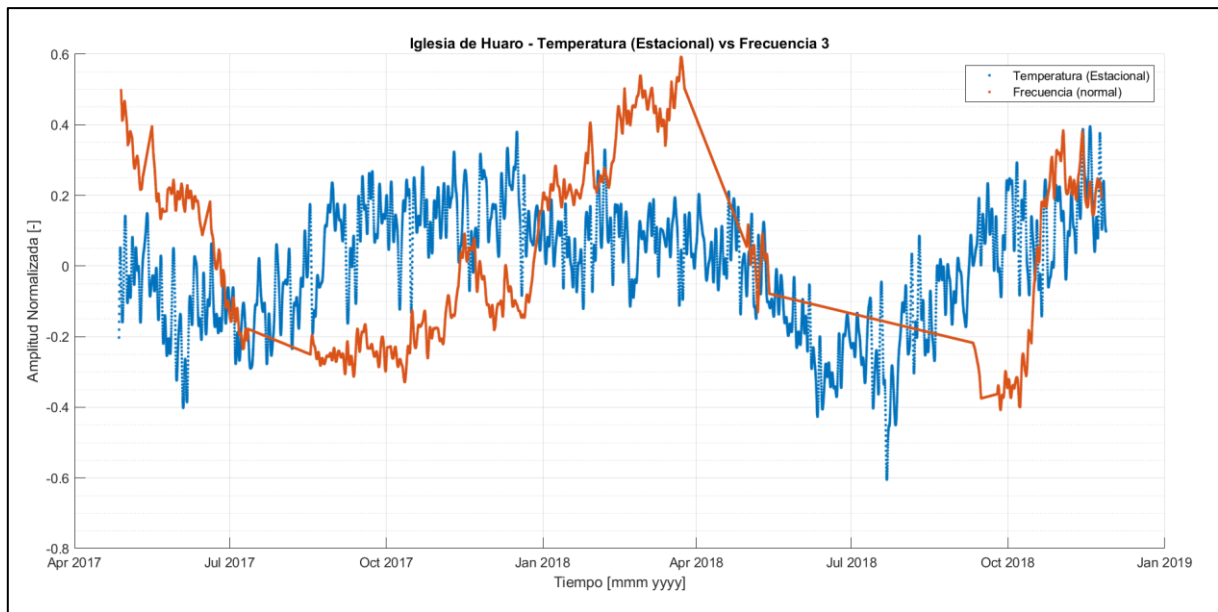


**Figura 5.73: Iglesia de Huaru, comparación temperatura ambiental vs frecuencia modal 1 (componentes estacionales).**



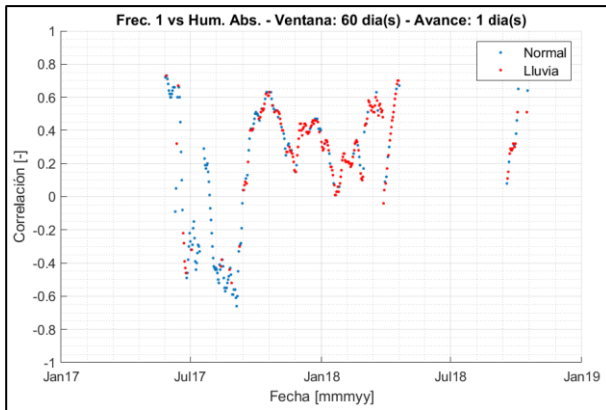
**Figura 5.74: Iglesia de Huaru, comparación temperatura ambiental vs frecuencia modal 2 (componentes estacionales).**



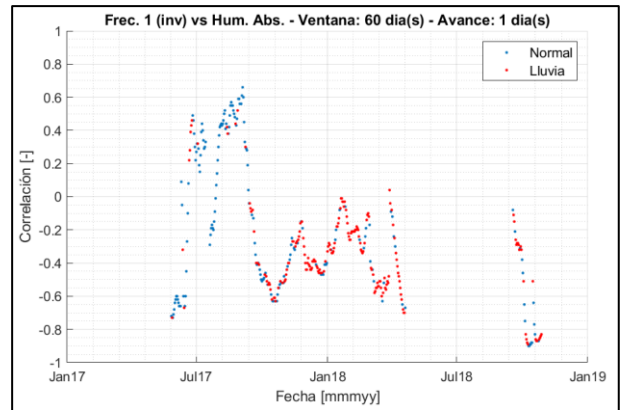


**Figura 5.75: Iglesia de Huaro, comparación temperatura ambiental vs frecuencia modal 3 (componentes estacionales).**

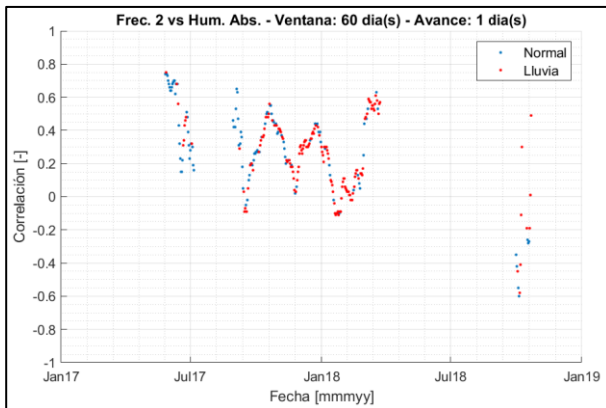
A continuación, se realiza un análisis por correlación entre la componente estacional de la humedad absoluta y de cada frecuencia a analizar. En la Figura 5.76 a la Figura 5.81 se muestran los resultados de este análisis, tanto para el caso de frecuencia modal invertida como no invertida. De estos resultados se tienen correlaciones mayormente positivas para el caso de frecuencia modal no invertida, que indican mediana correlación (entre 0.1 a 0.5). En particular, se observa una disminución importante para datos cercanos a Julio de 2017, la cual puede deberse al desfase presente entre humedad absoluta y frecuencia modal. Se tiene que las correlaciones entre frecuencia modal y humedad absoluta son más fuertes que el caso de frecuencia modal y temperatura.



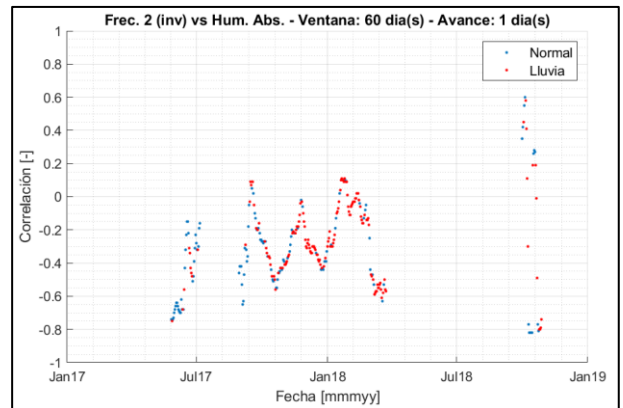
**Figura 5.76: Iglesia de Huaró, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad absoluta y frec. modal 1.**



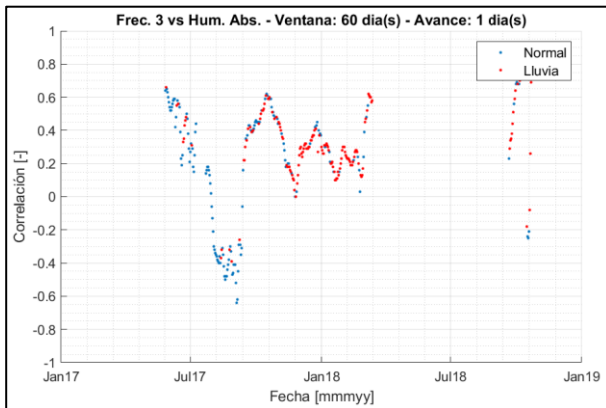
**Figura 5.77: Iglesia de Huaró, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad abs. y frec. modal 1 (invertida).**



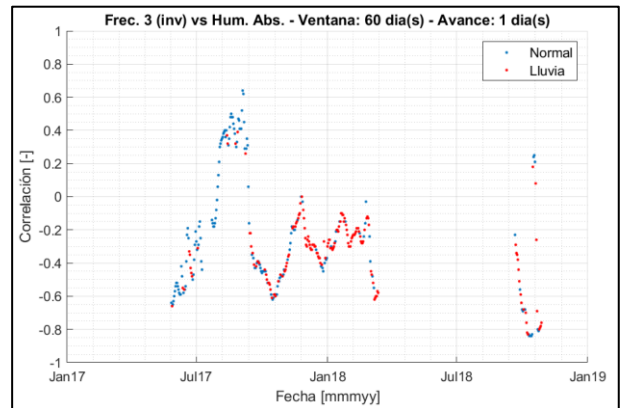
**Figura 5.78: Iglesia de Huaró, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad absoluta y frec. modal 2.**



**Figura 5.79: Iglesia de Huaró, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad abs. y frec. modal 2 (invertida).**



**Figura 5.80: Iglesia de Huaró, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad absoluta y frec. modal 3.**



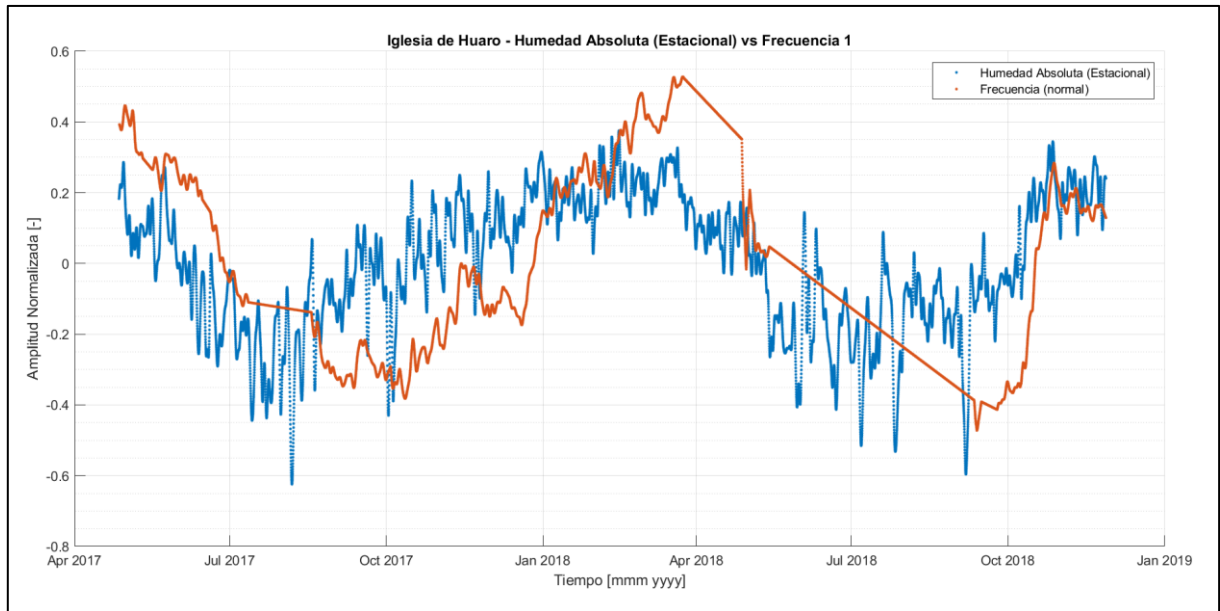
**Figura 5.81: Iglesia de Huaró, análisis por correlación entre componentes estacionales de humedad abs. y frec. modal 3 (invertida).**



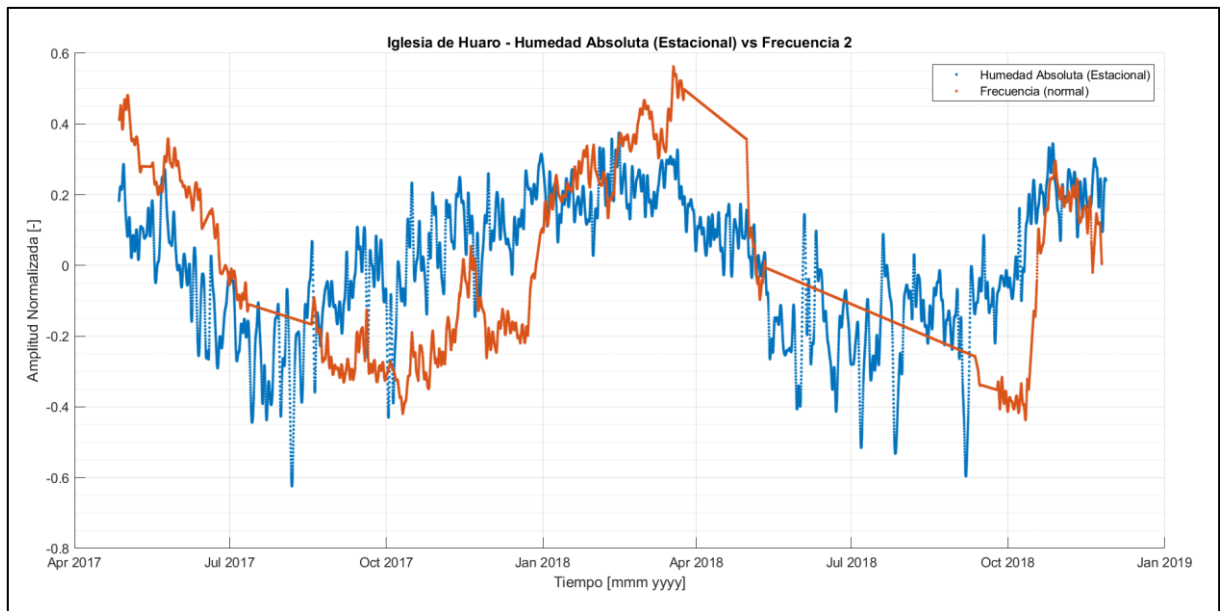
A continuación, se presenta una comparación directa entre la señal de humedad absoluta y cada frecuencia modal (componentes estacionales). Los resultados se presentan en la Figura 5.82 a la Figura 5.84. Nuevamente, las señales fueron normalizadas, interpoladas (para el caso de las frecuencias modales) y no se procedió a invertir las señales de frecuencia modal. De estos resultados, se hacen las siguientes observaciones:

- a) Dado que se la señal modal presenta un alto porcentaje de valores vacíos, la interpolación afecta de manera importante la calidad de la señal, por lo que ciertas partes de esta (rango entre julio-septiembre 2017 y rango entre abril y octubre 2018) no deben ser consideradas.
- b) Para el caso de esta estructura, se estima un desfase promedio de 1.5 meses entre la componente estacional de humedad y frecuencia.
- c) Por falta de datos, no se puede asegurar si el desfase entre ambas componentes estacionales es constante a través del año.
- d) Para todas las frecuencias modales, se tiene un comportamiento proporcional a la humedad absoluta. En el caso hipotético que se asuma un comportamiento inversamente proporcional para las frecuencias modales, se obtendría un desfase mayor a 6 meses entre la componente de humedad y frecuencia, lo que es poco probable.
- e) Se observa que las 3 frecuencias modales analizadas presentan la misma fase y mecanismo de respuesta entre sí. El mecanismo de respuesta asigna un comportamiento más suave cercanos a mínimos de humedad en invierno, mientras que asigna un comportamiento más agudo cercano a máximos de humedad en verano. Para este edificio, el mecanismo de respuesta de la frecuencia modal ante cambios de humedad absoluta es distinto según la estacionalidad.
- f) El mecanismo de respuesta observado de la componente estacional de las frecuencias modales es el mismo que se observó para el caso de Torre Central y la Iglesia de Andahuaylillas, presentando máximos agudos y mínimos suaves (o mínimos agudos y máximos suaves para el caso de frecuencia modal invertida).
- h) Los datos de transición entre máximos y mínimos estacionales presentan aproximadamente la misma pendiente entre ambas señales.
- i) Para la componente de humedad absoluta, se observa que la señal presenta un comportamiento suave tanto en invierno como en verano.

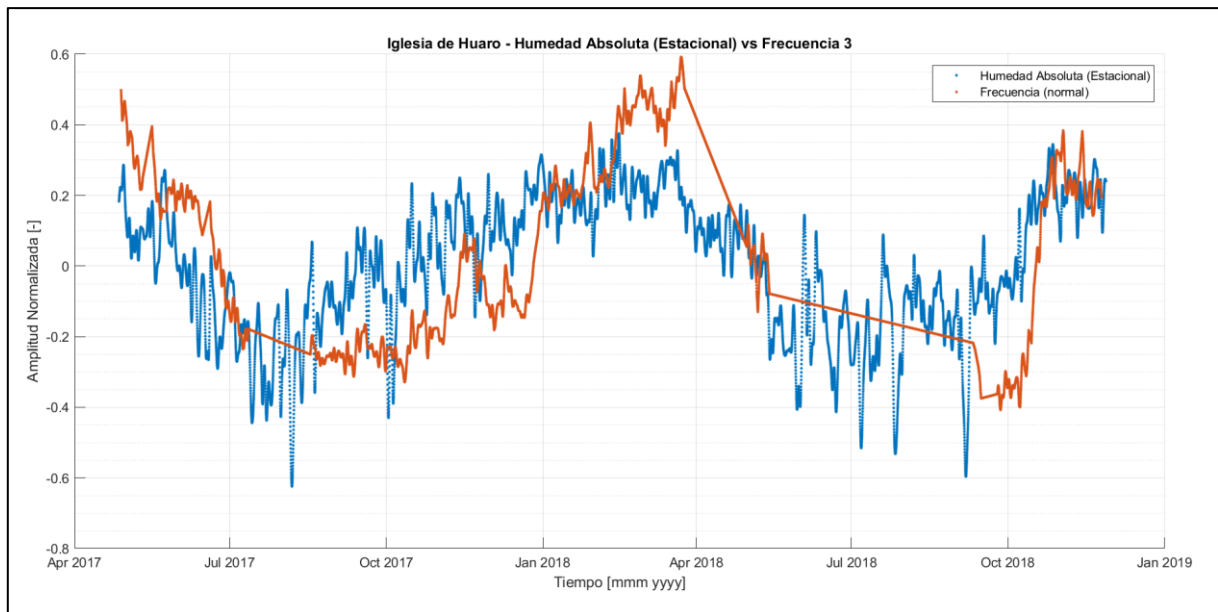
Para esta estructura (estructura de albañilería de adobe), se acepta que la humedad absoluta sea un mejor indicador que la temperatura para analizar la variación de las frecuencias modales de la estructura. Esto se refuerza tanto mediante la comparación directa entre ambas componentes estacionales de humedad absoluta y frecuencia modal, así como mediante los resultados del análisis por correlación de ambas variables. Dado que la estructura de esta iglesia cuenta del mismo material y similar estructuración que la iglesia de Andahuaylillas, presentando espesores promedio de 1.6 metros y alturas promedio de 11 metros, coincide que ambas iglesias presenten resultados similares entre sí. Nuevamente, se observa un desfase importante entre la componente estacional de humedad y frecuencia modal, el cual es causado debido a las extensas dimensiones y material de los muros de la iglesia.



**Figura 5.82: Iglesia de Huaro, comparación humedad absoluta vs frecuencia modal 1 (componentes estacionales).**



**Figura 5.83: Iglesia de Huaro, comparación humedad absoluta vs frecuencia modal 2 (componentes estacionales).**



**Figura 5.84: Iglesia de Huaro, comparación humedad absoluta vs frecuencia modal 3 (componentes estacionales).**

#### 5.4.2. Análisis Diario

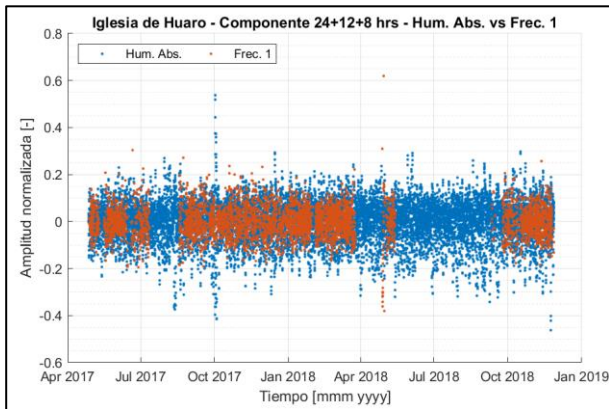
En la Figura 5.85 a la Figura 5.90 se muestra una comparación directa entre la componente diaria de la humedad absoluta contra la componente diaria de cada frecuencia modal a analizar. Se muestra tanto una comparación a escala anual como una comparación con un acercamiento diario. Nuevamente, para efectos de esta comparación, no se procedió a invertir ninguna frecuencia modal al ser comparada con la humedad absoluta.

De estas figuras se tienen los siguientes resultados:

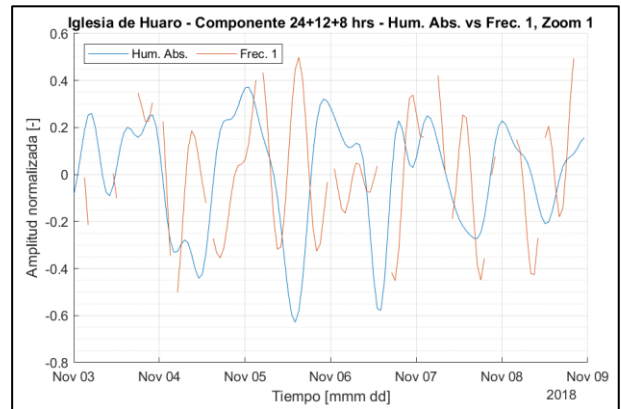
- a) Al realizar un acercamiento diario, se tiene que la componente de humedad y de frecuencia modal no se encuentran en fase. Esto indica que la respuesta de la frecuencia modal ante cambios de humedad absoluta no es inmediata.
- b) No es directo identificar si el ciclo diario de la frecuencia modal presenta un comportamiento inversamente proporcional o no respecto al ciclo diario de la humedad absoluta.
- c) Al realizar la comparación con un rango anual (Figura 5.85, Figura 5.87 y Figura 5.89), no es posible observar algún tipo de correlación entre ambas señales. Esto es en parte debido al porcentaje importante de valores vacíos en la data modal.

Dado a los altos porcentajes de valores vacíos en las señales de frecuencia modal, no es posible realizar mayores conclusiones a nivel diario. Debido al mismo motivo, no fue posible generar resultados de la variación del desfase entre la señal ambiental y señal modal (componentes diarias).

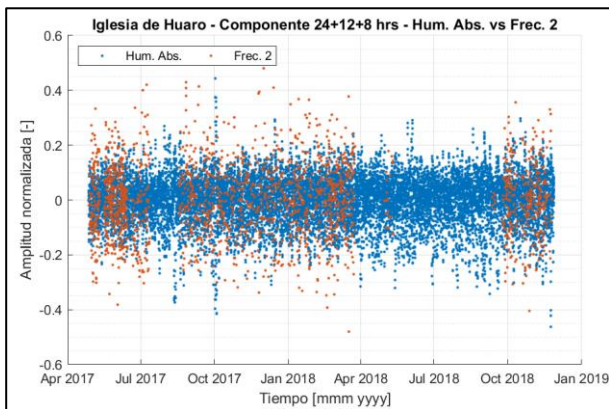
En la sección A.5.3 de Anexos se muestra una comparación directa entre la componente diaria de la temperatura ambiental contra la componente diaria de cada frecuencia modal a analizar.



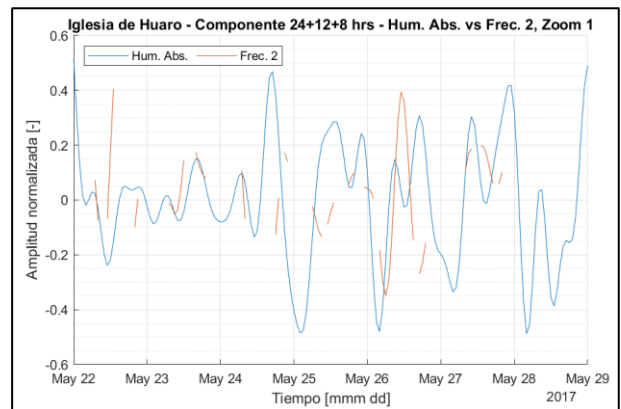
**Figura 5.85:** Iglesia de Huaru, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 1.



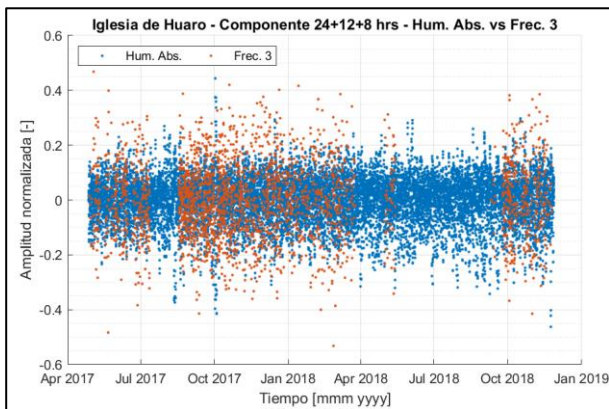
**Figura 5.86:** Iglesia de Huaru, componente diaria de humedad abs. y frec. 1, ventana de tiempo desde 21/mar/17 hasta 26/mar/17.



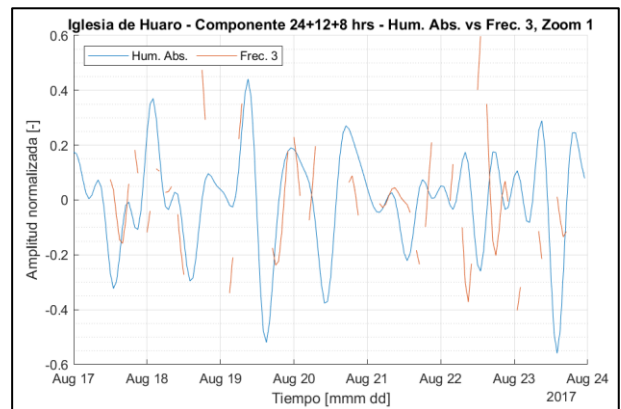
**Figura 5.87:** Iglesia de Huaru, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 2.



**Figura 5.88:** Iglesia de Huaru, componente diaria de humedad abs. y frec. 2, ventana de tiempo desde 21/mar/17 hasta 26/mar/17.



**Figura 5.89:** Iglesia de Huaru, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 3.



**Figura 5.90:** Iglesia de Huaru, componente diaria de humedad abs. y frec. 3, ventana de tiempo desde 21/mar/17 hasta 26/mar/17.

## **5.5 Muros de Adobe de Laboratorio**

### **5.5.1. Análisis Estacional**

Tal como se explicó anteriormente, no se realizará un análisis entre las componentes estacionales, principalmente debido a la presencia del proceso de endurecimiento en la data modal y la limitación que esta genera en la cantidad de data trabajable.

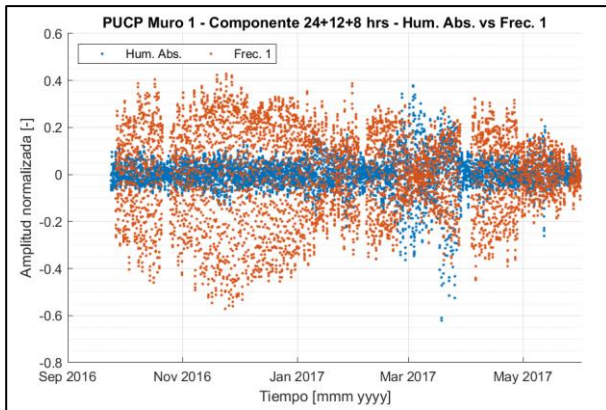
### **5.5.2. Análisis Diario – Muro tipo I**

En la Figura 5.91 a la Figura 5.98 se muestra una comparación directa entre la componente diaria de humedad absoluta contra la componente diaria de cada frecuencia modal a analizar. Se muestra tanto una comparación a escala anual como una comparación con un acercamiento diario. Nuevamente, para efectos de esta comparación, no se procedió a invertir ninguna frecuencia modal al ser comparada con la humedad absoluta. Dado que la estructura de los muros es albañilería de adobe, se parte con el supuesto que las frecuencias modales de la estructura presentarán una mejor correlación al ser comparadas con la humedad absoluta que con respecto a la temperatura ambiental (Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenco 2019a, 2019b).

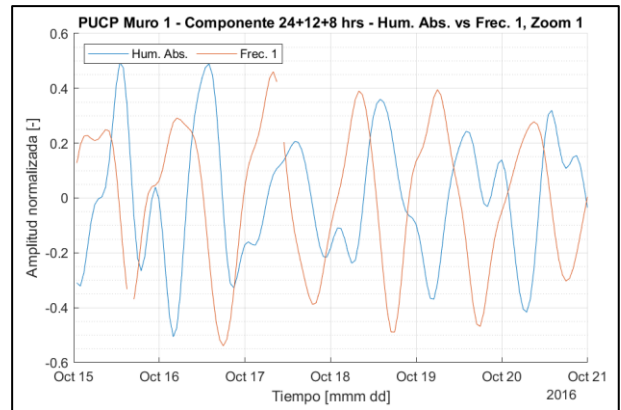
De estas figuras se tienen los siguientes resultados:

- a) Al realizar un acercamiento diario, se tiene que la señal de humedad absoluta y la señal de frecuencia modal no se encuentran en fase. Esto indica que la respuesta de la frecuencia modal ante cambios de humedad absoluta no es inmediata.
- b) No es directo identificar si el ciclo diario de la frecuencia modal presenta un comportamiento inversamente proporcional o no respecto al ciclo diario de la humedad absoluta.
- c) Al realizar la comparación anual, se observan ciclos posiblemente anuales para todas las frecuencias modales. Para las frecuencias modales 1, 2 y 4, se observa una envolvente que es máxima para el mes de diciembre, la cual disminuye su amplitud avanzando a enero y presenta su mínimo en marzo. Para la frecuencia modal 3, se presentan múltiples oscilaciones de la envolvente, presentando máximos en enero y marzo, contraria a forma de las demás frecuencias modales. Para estos casos, se tiene que estos ciclos son simétricos respecto al eje de oscilación de la señal. Dado que no se cuenta con una extensión de datos a través del año, no se puede asegurar que este comportamiento sea efectivamente algún tipo de ciclo anual.

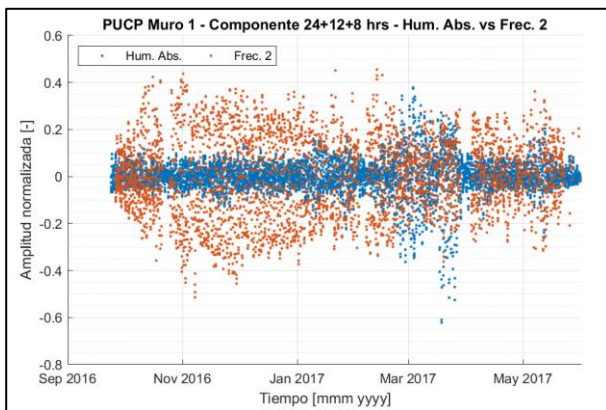




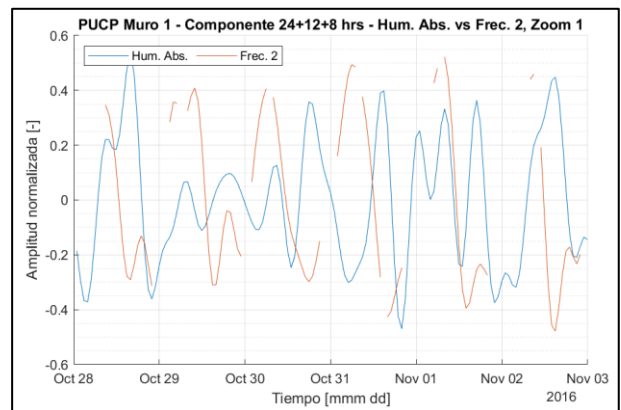
**Figura 5.91: Muro Tipo I, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 1.**



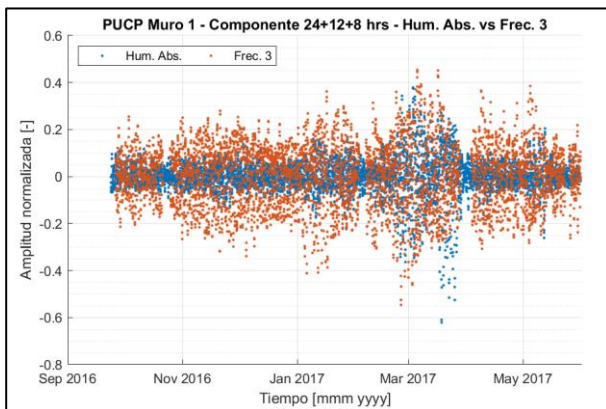
**Figura 5.92: Muro Tipo I, componente diaria de humedad abs. y frec. 1, ventana de tiempo desde 15/oct/16 hasta 21/oct/16.**



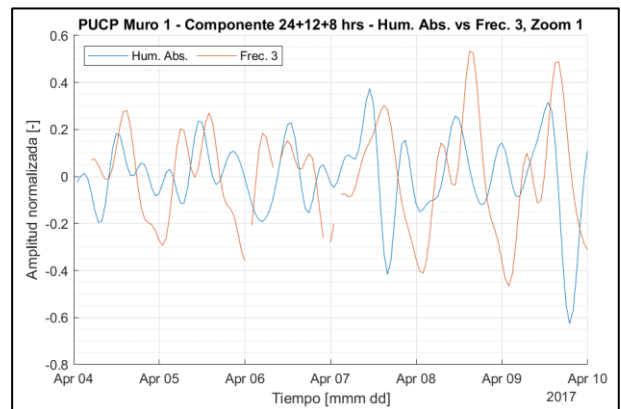
**Figura 5.93: Muro Tipo I, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 2.**



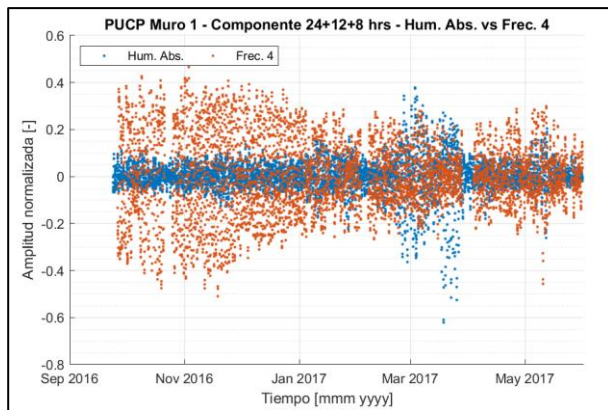
**Figura 5.94: Muro Tipo I, componente diaria de humedad abs. y frec. 2, ventana de tiempo desde 28/oct/16 hasta 03/nov/16.**



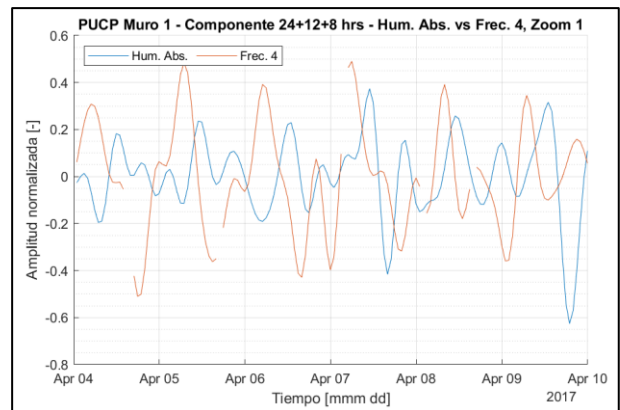
**Figura 5.95: Muro Tipo I, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 3.**



**Figura 5.96: Muro Tipo I, componente diaria de humedad abs. y frec. 3, ventana de tiempo desde 04/apr/17 hasta 10/apr/17.**



**Figura 5.97: Muro Tipo I, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 4.**



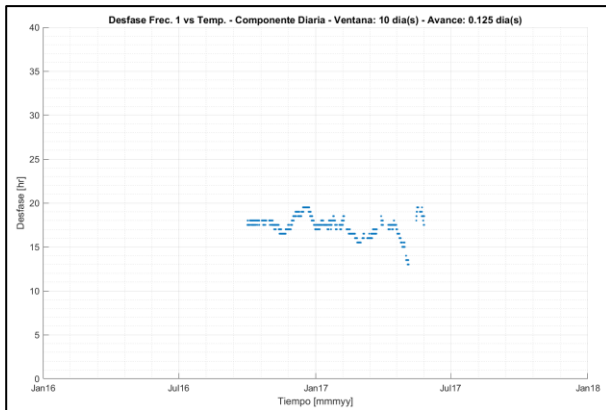
**Figura 5.98: Muro Tipo I, componente diaria de humedad abs. y frec. 4, ventana de tiempo desde 04/apr/17 hasta 10/apr/17.**

En la sección A.5.4 de los Anexos se muestra la misma comparación (anual y acercamiento diario) entre la componente diaria de la temperatura ambiental contra la componente diaria de cada frecuencia modal a analizar.

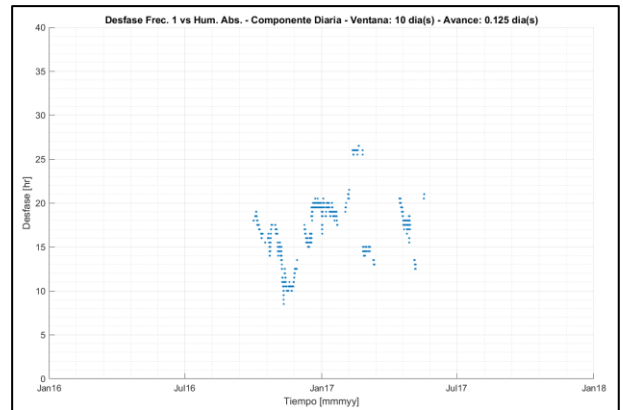
Según el procedimiento explicado en la sección 5.1, se procede a calcular el desfase entre las componentes diarias de la temperatura ambiental/humedad absoluta y cada frecuencia modal. Los resultados se presentan en la Figura 5.99 a la Figura 5.106. En el cálculo del desfase, se usó la siguiente configuración:

- Se utilizó ventanas de 10 días para calcular el desfase. Este valor se asignó debido a que era el que entregaba mejores resultados.
- El avance entre ventanas sucesivas corresponde a 0.125 días.
- El límite de vacíos para aceptar una ventana es de un 70%. Toda ventana con mayor porcentaje de vacíos es descartada.

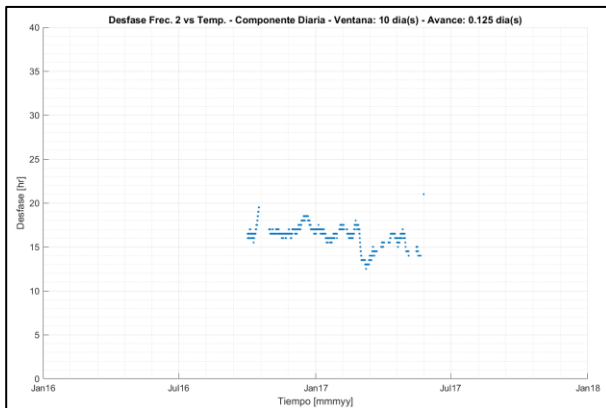
Se debe aclarar que en esta sección se muestran los resultados únicamente para frecuencias modales no invertidas. En la sección A.5.5 de los anexos se muestran los desfases calculados (tanto para temperatura como humedad) utilizando las frecuencias modales invertidas.



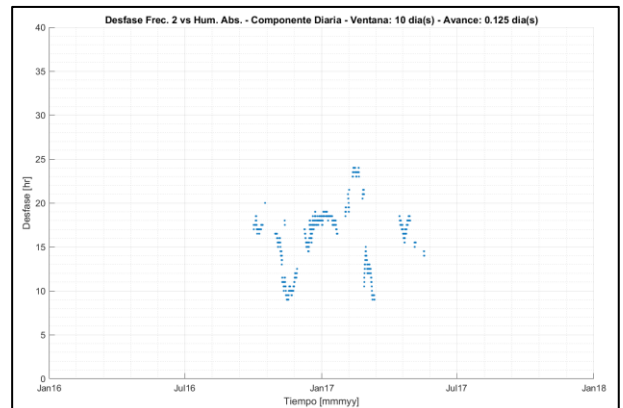
**Figura 5.99: Muro Tipo I, cálculo desfase entre componentes, temperatura ambiental y frec. modal 1.**



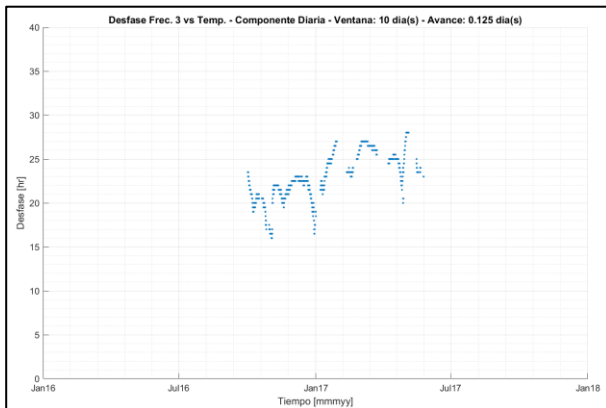
**Figura 5.100: Muro Tipo I, cálculo desfase entre componentes, humedad absoluta y frec. modal 1.**



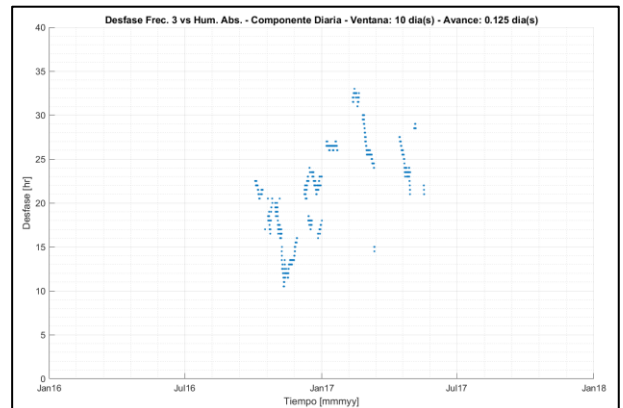
**Figura 5.101: Muro Tipo I, cálculo desfase entre componentes, temperatura ambiental y frec. modal 2.**



**Figura 5.102: Muro Tipo I, cálculo desfase entre componentes, humedad absoluta y frec. modal 2.**

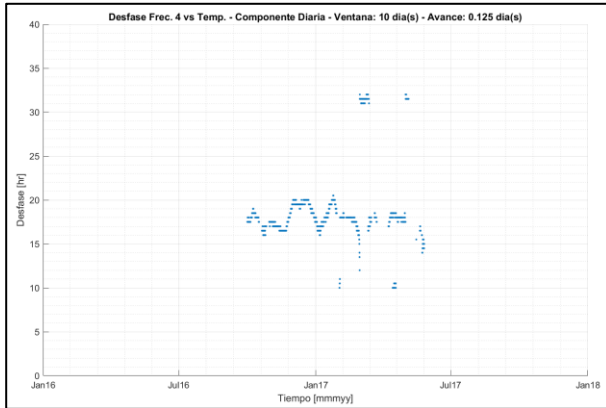


**Figura 5.103: Muro Tipo I, cálculo desfase entre componentes, temperatura ambiental y frec. modal 3.**

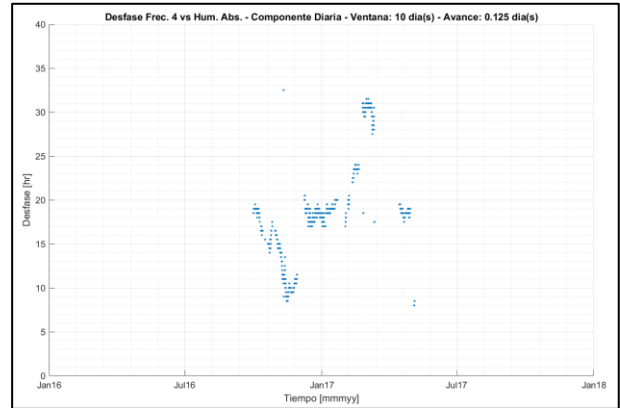


**Figura 5.104: Muro Tipo I, cálculo desfase entre componentes, humedad absoluta y frec. modal 3.**





**Figura 5.105: Muro Tipo I, cálculo desfase entre componentes, temperatura ambiental y frec. modal 4.**



**Figura 5.106: Muro Tipo I, cálculo desfase entre componentes, humedad absoluta y frec. modal 4.**

Para la Figura 5.99 a la Figura 5.106, se tienen los siguientes resultados:

- a) Se logra identificar curvas de variación de desfase a través del tiempo, tanto para la componente de temperatura ambiental como para la de humedad absoluta.
- b) En el caso de la temperatura ambiental, se observa un desfase constante con variaciones relativamente estables a través del tiempo para las frecuencias modales 1, 2 y 4, todas promediando un desfase de 18 horas. Esto tiene sentido, ya que las condiciones de temperatura ambiental son estables para la mayor parte del año. Para la frecuencia modal 3 se observa una tendencia de crecimiento, la cual va desde un desfase de 20 hasta un desfase de 25 horas. Esto se podría explicar debido a la presencia del endurecimiento del muro en la data del registro, el cual puede estar afectando de mayor manera el desfase diario de esta frecuencia modal con respecto a otras.
- c) Para el caso de la humedad absoluta, se observa que el mismo patrón se presenta en todas las frecuencias modales: desfase mínimo en octubre-noviembre del 2016, máximo en marzo-abril del 2017, oscilación en torno a un punto de equilibrio fijo, un comportamiento de máximos y mínimos agudos, y la generación de un ciclo completo que va desde octubre del 2016 hasta abril del 2017. Es posible que esta curva de desfase sea la correcta, pero hay que tomar en cuenta que: a) No se cuenta con una mayor extensión de datos para comprobar que este ciclo se repita en el tiempo; b) La extensión del ciclo no alcanza a ser anual, por lo que debería ocurrir dos veces al año. c) Existe el rango de posibles datos erróneos de la humedad absoluta entre marzo y abril del 2017, el cual puede estar arrojando resultados erróneos de desfase; d) Los máximos y mínimos locales de la curva de desfase ocurren en otoño y primavera respectivamente, los cuales en cambio se esperaría que ocurrieran en estaciones extremas (verano e invierno). Una alternativa al ciclo anteriormente mencionado es considerar otro ciclo distinto, el cual se produce desde septiembre-octubre del 2016 hasta inicios del 2017. La ventaja de este supuesto es que la oscilación presenta un mínimo agudo (noviembre del 2016) y un máximo suave (enero 2017), de la misma manera que los resultados de Torre Central (Figura 5.35 a la Figura 5.37). Sin embargo, el ciclo

presenta una duración de cuarto de año, la cual es contraria al caso de Torre Central, puesto que presentaba un ciclo anual. Además, para que el ciclo mencionado se mantenga consistente, se asume que el rango de valores entre marzo y abril del 2017 son erróneos. Nuevamente, debido a que no se cuenta con mayor extensión de la data, no es posible asegurar la veracidad del ciclo mencionado.

- d) Para este caso de análisis de componente diaria, no es directo asegurar qué señal ambiental externa es mejor indicador para correlacionar los cambios en la frecuencia modal, dado que ambas generan resultados coherentes pero diferentes.
- e) Dado que se cuenta con registros de datos de extensión menor a un año, no es posible generar con seguridad conclusiones acerca del comportamiento del desfase de la componente diaria para las distintas estaciones del año.

Nuevamente, se puede argumentar que algunos valores de desfase pueden resultar elevados, por lo que es posible considerar el caso de la curva de desfase para una frecuencia invertida, y tomarlo como el caso correcto. Sin embargo, como se explicó anteriormente, para efectos de esta memoria, este hecho no será comprobado, donde únicamente se limitará a presentar ambos resultados (desfases para frecuencias invertidas y no invertidas), sin considerar ninguna de estas posibilidades como correcta o incorrecta.

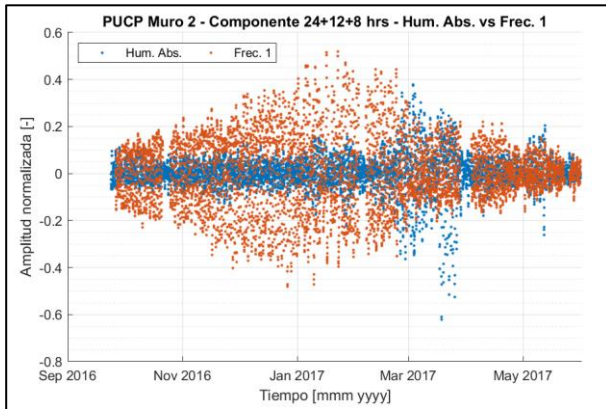
### **5.5.3. Análisis Diario – Muro tipo II**

En la Figura 5.107 a la Figura 5.112 se muestra una comparación directa entre la componente diaria de la humedad absoluta contra la componente diaria de cada frecuencia modal a analizar. Se muestra tanto una comparación anual como una comparación con un acercamiento diario. Dado que la estructura de los muros es albañilería de adobe, se parte con el supuesto que las frecuencias modales de la estructura presentarán una mejor correlación al ser comparadas con la humedad absoluta que con respecto a la temperatura ambiental.

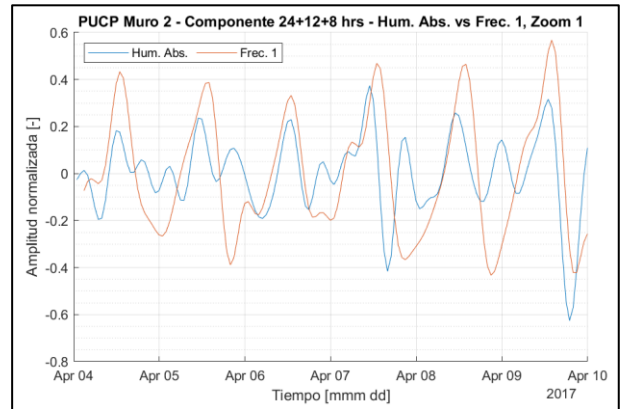
De estas figuras se tienen los siguientes resultados:

- a) Al realizar un acercamiento diario, se tiene que la señal de humedad absoluta y la señal de frecuencia modal no necesariamente se encuentran en fase.
- b) No es directo identificar si el ciclo diario de la frecuencia modal presenta un comportamiento inversamente proporcional o no respecto al ciclo diario de la humedad absoluta.
- c) Al realizar la comparación anual, se observa un ciclo posiblemente anual para la primera frecuencia modal, donde se observa una envolvente que es máxima para el mes de enero-febrero (verano), la cual disminuye su amplitud a medida que se aleja de la estación. Para las demás frecuencias modales, no se observa claramente algún tipo de ciclo estacional en la data. Para estos casos, se tiene que estos ciclos son relativamente simétricos respecto al eje de oscilación de la

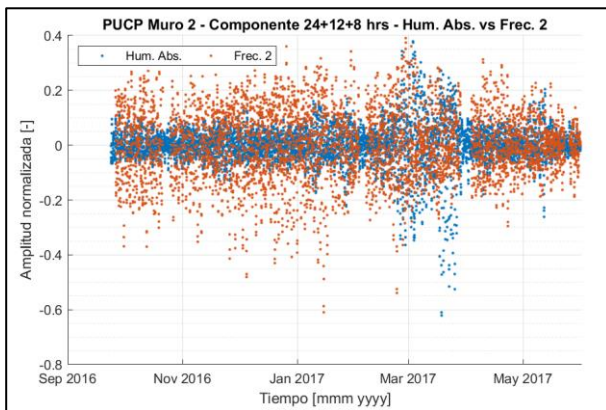
señal. Dado que no se cuenta con una extensión de datos a través del año, no se puede asegurar que este comportamiento sea efectivamente algún tipo de ciclo anual.



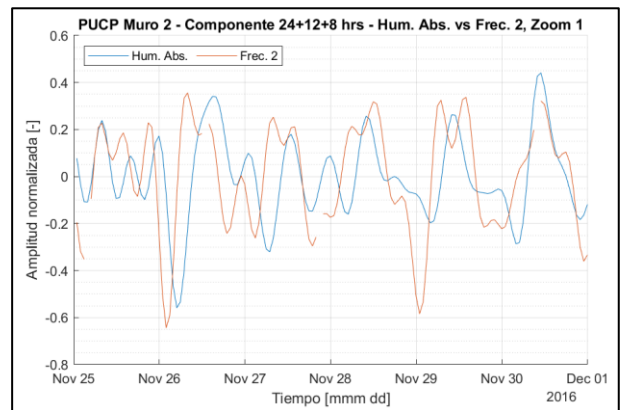
**Figura 5.107: Muro Tipo II, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 1.**



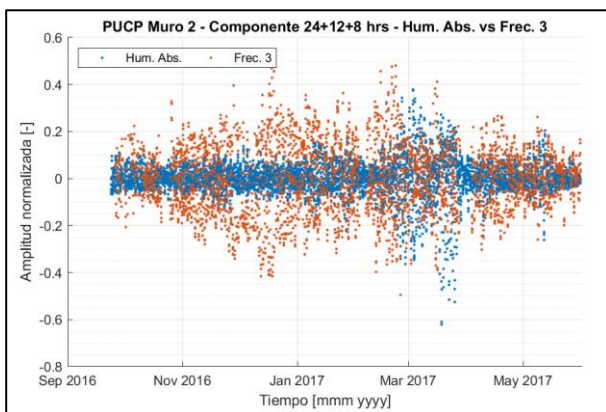
**Figura 5.108: Muro Tipo II, componente diaria de humedad abs. y frec. 1, ventana de tiempo desde 04/apr/17 hasta 10/apr/17.**



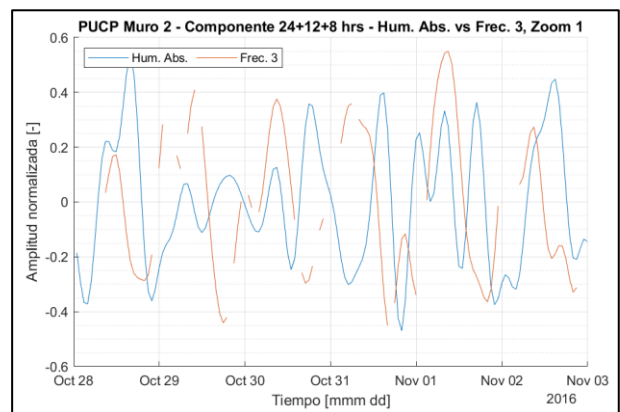
**Figura 5.109: Muro Tipo II, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 2.**



**Figura 5.110: Muro Tipo II, componente diaria de humedad abs. y frec. 2 ventana de tiempo desde 25/nov/16 hasta 01/dic/16.**



**Figura 5.111: Muro Tipo II, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 3.**



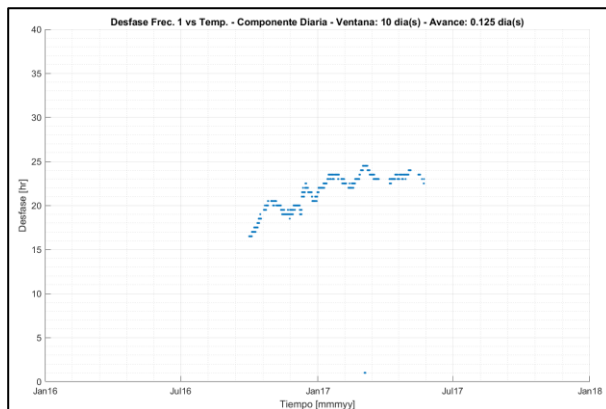
**Figura 5.112: Muro Tipo II, componente diaria de humedad abs. y frec. 3, ventana de tiempo desde 28/oct/16 hasta 03/nov/16.**

En la sección A.5.6 de los Anexos se muestra la misma comparación (anual y acercamiento diario) entre la componente diaria de la temperatura ambiental contra la componente diaria de cada frecuencia modal a analizar.

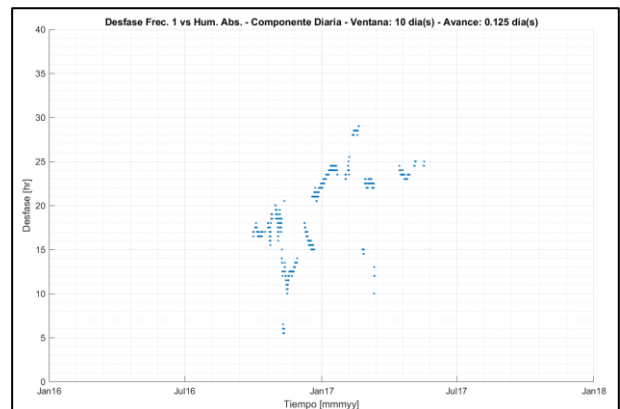
Según el procedimiento explicado en la sección 5.1, se procede a calcular el desfase entre las componentes diarias de la temperatura ambiental/humedad absoluta y cada frecuencia modal. Los resultados se presentan en la Figura 5.113 a la Figura 5.118. En el cálculo del desfase, se usó la siguiente configuración:

- Se utilizó ventanas de 10 días para calcular el desfase. Este valor se asignó debido a que era el que entregaba mejores resultados.
- El avance entre ventanas sucesivas corresponde a 0.125 días.
- El límite de vacíos para aceptar una ventana es de un 70%. Toda ventana con mayor porcentaje de vacíos es descartada.

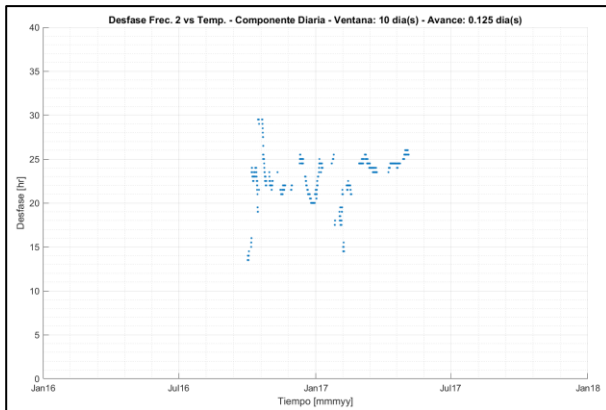
Se debe aclarar que en esta sección se muestran los resultados únicamente para frecuencias modales no invertidas. En la sección A.5.7 de los anexos se muestran los desfases calculados (tanto para temperatura como humedad) utilizando las frecuencias modales invertidas.



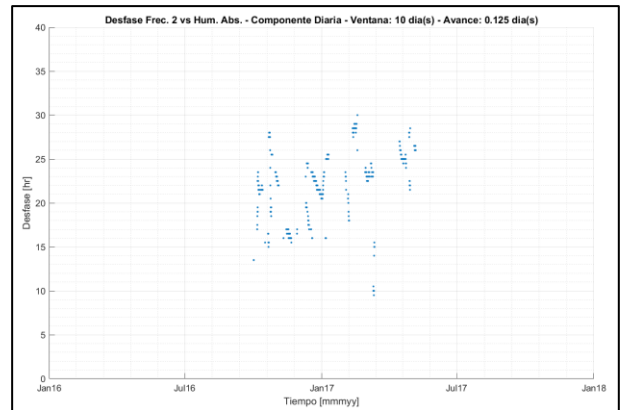
**Figura 5.113: Muro Tipo II, cálculo desfase entre componentes, temperatura ambiental y frec. modal 1.**



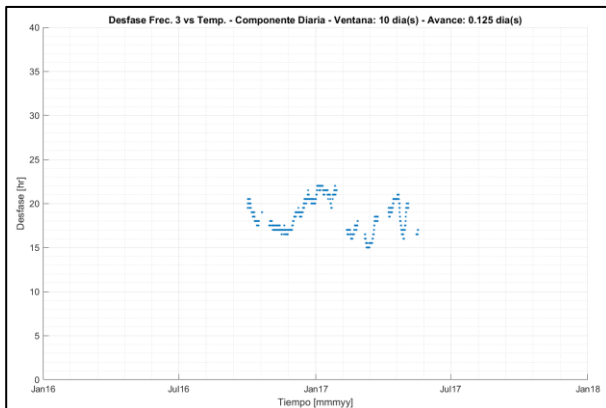
**Figura 5.114: Muro Tipo II, cálculo desfase entre componentes, humedad absoluta y frec. modal 1.**



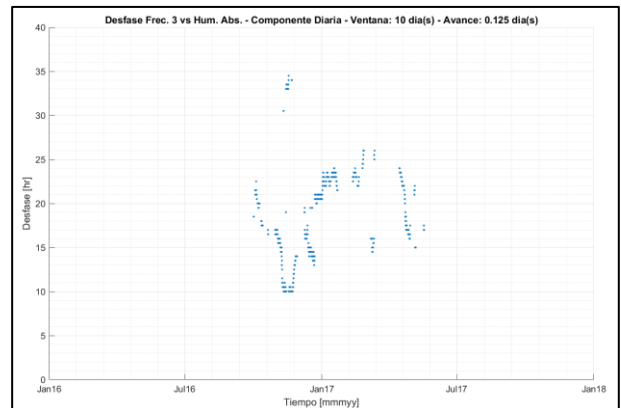
**Figura 5.115: Muro Tipo II, cálculo desfase entre componentes, temperatura ambiental y frec. modal 2.**



**Figura 5.116: Muro Tipo II, cálculo desfase entre componentes, humedad absoluta y frec. modal 2.**



**Figura 5.117: Muro Tipo II, cálculo desfase entre componentes, temperatura ambiental y frec. modal 3.**



**Figura 5.118: Muro Tipo II, cálculo desfase entre componentes, humedad absoluta y frec. modal 3.**

Para la Figura 5.113 a la Figura 5.118, se tienen los siguientes resultados:

- a) Se logra identificar curvas de variación de desfase a través del tiempo, tanto para la componente de temperatura ambiental como para la de humedad absoluta.
- b) En el caso de la temperatura ambiental, se observa un desfase estable para la frecuencia modal 3, la que incluso presenta una oscilación de desfase desde mitades de 2016 hasta enero-febrero del 2017, la que se cree que continua en una nueva oscilación en el periodo de enero-febrero 2017 hasta mediados del 2017, pero la definición de la data en ese periodo no permite determinarlo. Esto es congruente con la estabilidad de las condiciones de temperatura ambiental para este caso. La frecuencia modal 2 presenta un comportamiento similar a la frecuencia modal 3, solo que con una menor definición de los datos de desfase. En el caso de la frecuencia modal 1, se observa un comportamiento creciente, el cual puede estar relacionado con la presencia del endurecimiento del muro que simultáneamente ocurre en ese periodo, el cual puede estar afectando de mayor manera el desfase diario de esta frecuencia modal con respecto a otras.

- c) Para el caso de la humedad absoluta, se observa el mismo patrón de comportamiento del desfase entre la primera y tercera frecuencia modal. Más aún, se repite el mismo patrón de comportamiento que el resultado obtenido de humedad absoluta para el muro tipo I (Figura 5.100, Figura 5.102, Figura 5.104 y Figura 5.106). Las conclusiones entregadas para aquel caso de muro tipo I aplican para esta sección. Para el caso de la segunda frecuencia modal, no se logra observar ningún patrón de comportamiento.
- d) Para este caso de análisis de componente diaria, no es directo asegurar qué señal ambiental es mejor indicador para correlacionar los cambios en la frecuencia modal, dado que ambas generan resultados coherentes pero diferentes.
- e) Dado que se cuenta con registros de datos de extensión menor a un año, no es posible generar con seguridad conclusiones acerca del comportamiento del desfase de la componente diaria para las distintas estaciones del año.

Nuevamente, se puede argumentar que algunos valores de desfase pueden resultar elevados, por lo que es posible considerar el caso de la curva de desfase para una frecuencia invertida, y tomarlo como el caso correcto. Sin embargo, como se explicó anteriormente, para efectos de esta memoria, este hecho no será comprobado, donde únicamente se limitará a presentar ambos resultados (desfases para frecuencias invertidas y no invertidas), sin considerar ninguna de estas posibilidades como correcta o incorrecta.

#### **5.5.4. Análisis Diario – Muro tipo III**

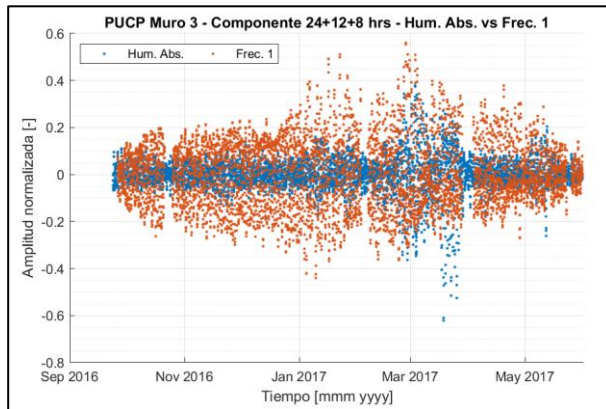
En la Figura 5.119 a la Figura 5.124 se muestra una comparación directa entre la componente diaria de la humedad absoluta contra la componente diaria de cada frecuencia modal a analizar. Se muestra tanto una comparación anual como una comparación con un acercamiento diario. Dado que la estructura de los muros es albañilería de adobe, se parte con el supuesto que las frecuencias modales de la estructura presentarán una mejor correlación al ser comparadas con la humedad absoluta que con respecto a la temperatura ambiental.

De estas figuras se tienen los siguientes resultados:

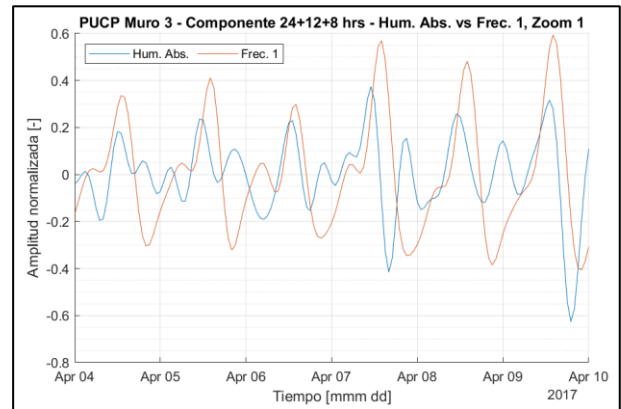
- a) Al realizar un acercamiento diario, se tiene que la señal de humedad absoluta y la señal de frecuencia modal no necesariamente se encuentran en fase.
- b) No es directo identificar si el ciclo diario de la frecuencia modal presenta un comportamiento inversamente proporcional o no respecto al ciclo diario de la humedad absoluta.
- c) Al realizar la comparación anual, se observa un ciclo posiblemente anual para la tercera frecuencia modal, donde se observa una envolvente que es máxima para el mes de enero-febrero (verano), la cual disminuye su amplitud a medida que se aleja de la estación. Este fenómeno se repite en menor medida para las frecuencias modales 1 y 2. Para estos casos, se tiene que estos ciclos son



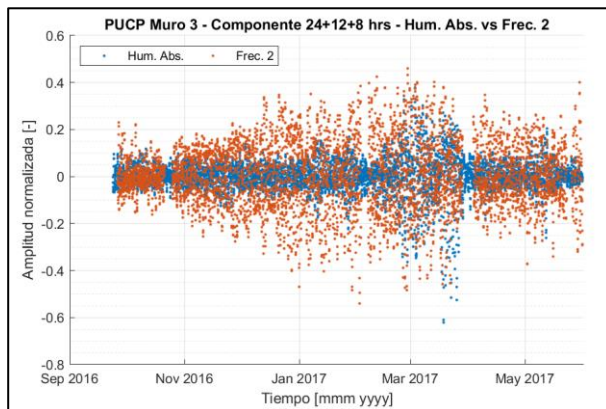
relativamente simétricos respecto al eje de oscilación de la señal. Dado que no se cuenta con una extensión de datos a través del año, no se puede asegurar que este comportamiento sea efectivamente algún tipo de ciclo anual.



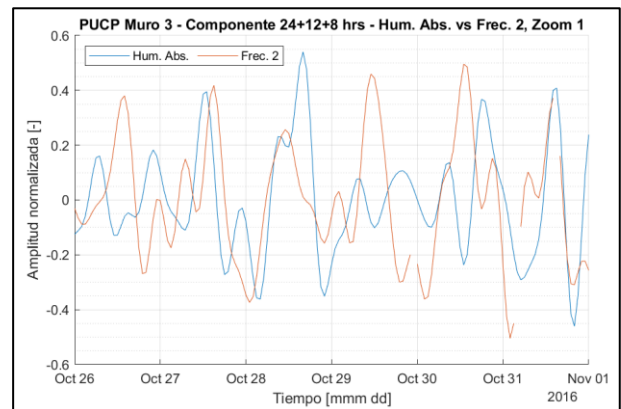
**Figura 5.119: Muro Tipo III, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 1.**



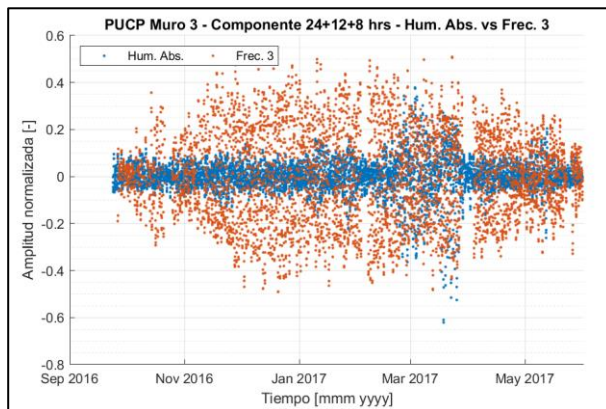
**Figura 5.120: Muro Tipo III, componente diaria de humedad abs. y frec. 1, ventana de tiempo desde 04/apr/17 hasta 10/apr/17.**



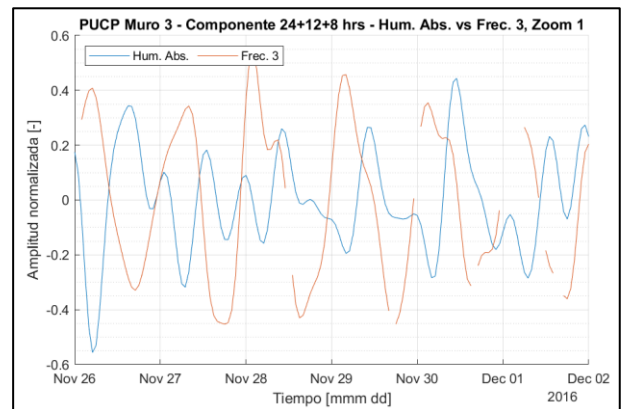
**Figura 5.121: Muro Tipo III, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 2.**



**Figura 5.122: Muro Tipo III, componente diaria de humedad abs. y frec. 2, ventana de tiempo desde 26/oct/16 hasta 01/nov/16.**



**Figura 5.123: Muro Tipo III, comparación componente diaria de humedad absoluta y frec. 3.**



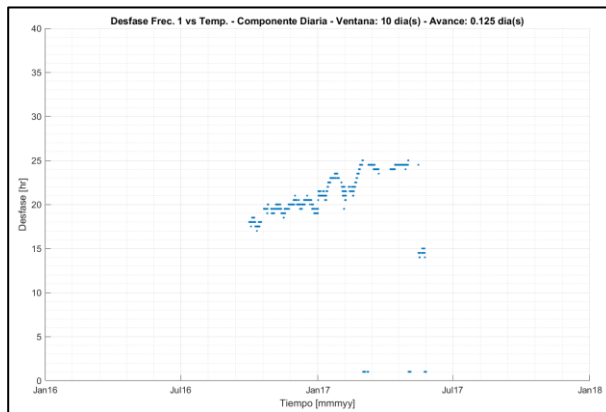
**Figura 5.124: Muro Tipo III, componente diaria de humedad abs. y frec. 3, ventana de tiempo desde 26/nov/16 hasta 02/dec/16.**

En la sección A.5.8 de los Anexos se muestra la misma comparación (anual y acercamiento diario) entre la componente diaria de la temperatura ambiental contra la componente diaria de cada frecuencia modal a analizar.

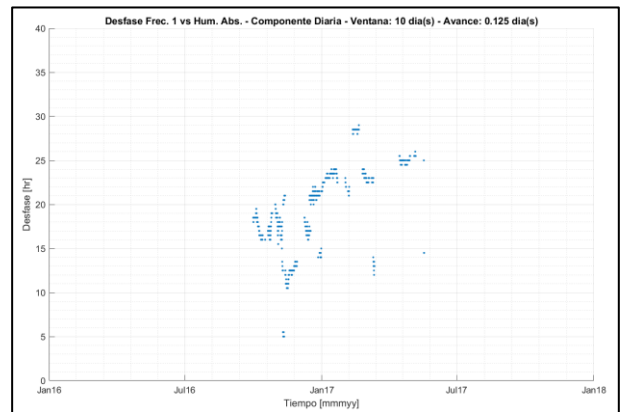
Según el procedimiento explicado en la sección 5.1, se procede a calcular el desfase entre las componentes diarias de la temperatura ambiental/humedad absoluta y cada frecuencia modal. Los resultados se presentan en la Figura 5.125 a la Figura 5.130. En el cálculo del desfase, se usó la siguiente configuración:

- Se utilizó ventanas de 10 días para calcular el desfase. Este valor se asignó debido a que era el que entregaba mejores resultados.
- El avance entre ventanas sucesivas corresponde a 0.125 días.
- El límite de vacíos para aceptar una ventana es de un 70%. Toda ventana con mayor porcentaje de vacíos es descartada.

Se debe aclarar que en esta sección se muestran los resultados únicamente para frecuencias modales no invertidas. En la sección A.5.9 de los anexos se muestran los desfases calculados (tanto para temperatura como humedad) utilizando las frecuencias modales invertidas.

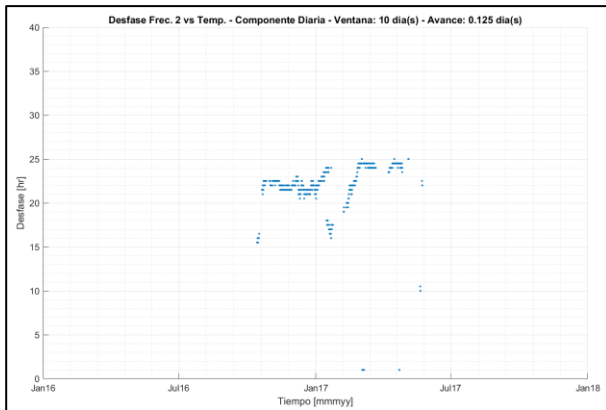


**Figura 5.125: Muro Tipo III, cálculo desfase entre componentes, temperatura ambiental y frec. modal 1.**

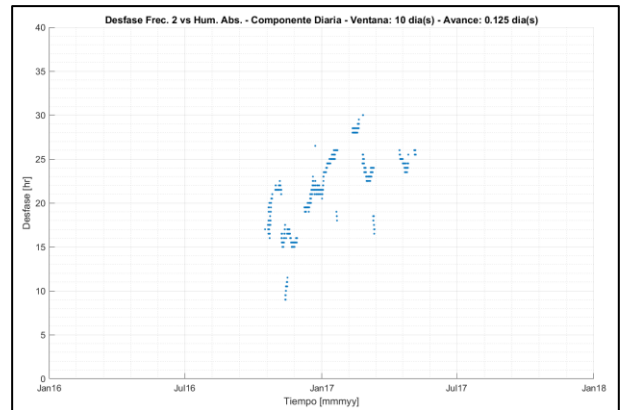


**Figura 5.126: Muro Tipo III, cálculo desfase entre componentes, humedad absoluta y frec. modal 1.**

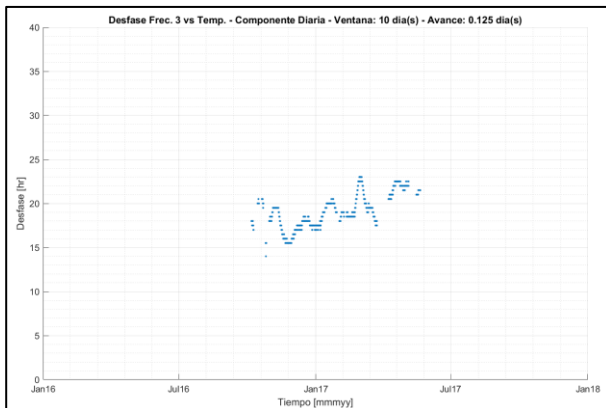




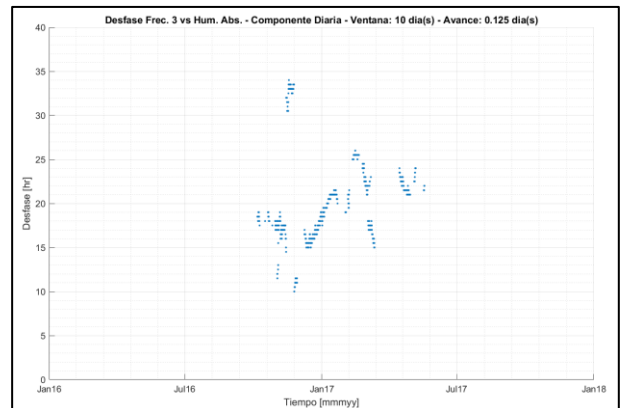
**Figura 5.127: Muro Tipo III, cálculo desfase entre componentes, temperatura ambiental y frec. modal 2.**



**Figura 5.128: Muro Tipo III, cálculo desfase entre componentes, humedad absoluta y frec. modal 2.**



**Figura 5.129: Muro Tipo III, cálculo desfase entre componentes, temperatura ambiental y frec. modal 3.**



**Figura 5.130: Muro Tipo III, cálculo desfase entre componentes, humedad absoluta y frec. modal 3.**

Para la Figura 5.125 a la Figura 5.130, se tienen los siguientes resultados:

- Se logra identificar curvas de variación de desfase a través del tiempo, tanto para la componente de temperatura ambiental como para la de humedad absoluta.
- En el caso de la temperatura ambiental, se observa un desfase constante con variaciones relativamente estables a través del tiempo para la frecuencia modal 2, promediando un desfase de 22 horas. Esto tiene sentido, ya que las condiciones de temperatura ambiental son estables para la mayor parte del año. Para las frecuencias modales 1 y 3 se observa una tendencia de crecimiento. Esto se podría explicar debido a la presencia del endurecimiento del muro en los datos, el cual puede estar afectando de mayor manera el desfase diario de estas frecuencias modales respecto a otras. Es posible que el mayor espesor del muro (respecto a los muros tipo I y II) condicione a las frecuencias a presentar mayor sensibilidad frente al endurecimiento del muro.
- Para el caso de la humedad absoluta, se observa el mismo patrón de comportamiento del desfase entre las tres frecuencias modales. Más aún, se observa el mismo patrón de comportamiento que el resultado obtenido de

humedad absoluta para el muro tipo I (Figura 5.100, Figura 5.102, Figura 5.104 y Figura 5.106). Las conclusiones entregadas para aquel caso de muro tipo I aplican para esta sección.

- d) Para este caso de análisis de componente diaria, no es directo asegurar qué señal ambiental es mejor indicador para correlacionar los cambios en la frecuencia modal, dado que ambas generan resultados coherentes pero diferentes.
- e) Dado que se cuenta con registros de datos de extensión menor a un año, no es posible generar con seguridad conclusiones acerca del comportamiento del desfase de la componente diaria para las distintas estaciones del año.

Nuevamente, se puede argumentar que algunos valores de desfase pueden resultar elevados, por lo que es posible considerar el caso de la curva de desfase para una frecuencia invertida, y tomarlo como el caso correcto. Sin embargo, como se explicó anteriormente, para efectos de esta memoria, este hecho no será comprobado, donde únicamente se limitará a presentar ambos resultados (desfases para frecuencias invertidas y no invertidas), sin considerar ninguna de estas posibilidades como correcta o incorrecta.

## Capítulo 6 : CONCLUSIONES

El método y análisis mediante filtrado de componentes se logró aplicar exitosamente a los registros ambientales y modales de distintos tipos estructuras, logrando: a) identificar y separar los comportamientos simultáneos de variación estacional y diaria presentes en los diferentes registros; y b) comparar cada uno de estos comportamientos de manera separada, permitiendo obtener nueva información y mayor claridad de resultados con respecto al caso que se comparan las variables de interés con ambos comportamientos aún acoplados. La metodología descrita en la memoria resulta en un método que permite trabajar por sobre posibles problemas que estén presentes en la data, tal como es el caso de la presencia de valores vacíos en los registros de frecuencias modales, el cual es un problema común en la práctica.

La principal conclusión de esta memoria es la identificación y caracterización de los dos mecanismos de variación de las frecuencias modales respecto a los parámetros ambientales de temperatura y humedad absoluta: un mecanismo de variación estacional y un mecanismo de variación diario.

Se tiene que ambos mecanismos presentan comportamientos característicos según la estación del año, más específicamente, según verano o invierno. Para el caso del mecanismo estacional, este presenta comportamientos opuestos para invierno y verano, donde se observan máximos y mínimos estacionales de frecuencia, uno asignado a la época de verano y el restante asignado a la época de invierno. Respecto al mecanismo diario, para el caso de Torre Central se observa que el desfase de la respuesta de la frecuencia modal ante el parámetro ambiental presenta una variación continua y regular en el tiempo, la cual adquiere sus valores extremos de desfase para las estaciones de invierno y de verano. Sin embargo, no es posible asegurar que este mismo comportamiento del mecanismo diario se presente en otras estructuras de concreto armado, dado que únicamente se logró identificar para una única estructura (Torre Central). A modo general, a pesar de que no es posible generalizar estas conclusiones como válidas para todo tipo de estructura (dado que en esta memoria no se analizan todos los tipos posibles de material, estructuración o diferentes tipos de clima), si es posible identificar comportamientos comunes entre las diferentes estructuras de estudio. Estas se detallan a continuación.

Para el caso del mecanismo estacional, se observa que la variación estacional de la frecuencia modal sigue de muy buena manera la variación estacional del parámetro ambiental predominante (para el caso de cada estructura). Para el mecanismo estacional, se tiene que la variación de la frecuencia modal presenta un comportamiento más suave para los mínimos estacionales de frecuencia modal, mientras que se observa un comportamiento mucho más agudo para los máximos estacionales de frecuencia. Este hecho es importante, ya que, a pesar de los diferentes materiales predominantes de cada sistema estructural analizado, la respuesta de la componente estacional de la frecuencia mantiene la misma forma entre cada una de estas estructuras. Para el caso de Torre

Central, se tiene que los mínimos estacionales de frecuencia ocurren para un máximo estacional de temperatura (verano), dado que, para esta estructura, la frecuencia modal se comporta inversamente proporcional a la temperatura ambiental. En el caso de las Iglesias, donde la frecuencia modal es proporcional a la humedad absoluta, se tiene que un mínimo de frecuencia está asociado a un mínimo de humedad. Dado este hecho, se tiene que los mínimos o máximos de frecuencia no necesariamente ocurren para una condición ambiental específica, sino que dependen de la forma en que la frecuencia modal se relacione con el parámetro ambiental predominante.

Un hecho importante, es que, aparentemente, el mecanismo estacional es idéntico entre frecuencias modales, dado que, para las distintas frecuencias analizadas de un mismo edificio, todas compartían la misma forma de variación y la misma fase con respecto al parámetro ambiental que se esté comparando, dejando como única diferencia la amplitud de variación del mecanismo estacional entre frecuencias modales. A modo de aclaración, se indica que el mecanismo es “aparentemente idéntico entre frecuencias” debido a que no se asegura que no exista un contraejemplo de este hecho observado.

Otro detalle importante del mecanismo estacional es la fase que presenta la componente estacional de frecuencia modal con respecto a la componente estacional del parámetro ambiental. Para el caso de Torre Central, se presenta un desfase prácticamente nulo con respecto a la temperatura ambiental, mientras que para el caso de las iglesias se observó un desfase promedio de 1.5 meses respecto al registro de humedad absoluta. Esto se puede explicar mediante la comparación entre el tamaño de los componentes estructurales de ambos casos. Torre Central presenta muros de hormigón armado que cuenta con un espesor promedio de 35 centímetros, los cuales son delgados al compararse contra los muros de albañilería de adobe de las iglesias, los cuales están en el orden de entre 110 y 180 centímetros de espesor. Es posible asumir que, para muros delgados la respuesta modal estacional es prácticamente inmediata respecto al medio ambiente, mientras que, para muros gruesos (espesor mayor a 1 metro), se produce un desfase estacional importante entre frecuencia modal y el parámetro ambiental. Lamentablemente, no fue posible realizar el análisis estacional para los muros de albañilería de adobe de la PUCP, el cual podría reforzar y comprobar la veracidad de esta última hipótesis. Nuevamente, se reitera que el desfase estacional para las iglesias de albañilería de adobe es bastante elevado. Se cree que este fenómeno es producto de: a) El gran tamaño y dimensión de los muros de las iglesias, el cual hace que sea más lento el traspaso de temperatura/humedad desde el ambiente hacia el material mismo de la estructura; y b) La gran inercia térmica del material (adobe), el cual sumado a las grandes dimensiones de la estructura, hace que el traspaso de temperatura/humedad sea aún más lento.

Referente al análisis diario, se observa que la mejor calidad de resultados se obtiene para el caso de Torre Central, principalmente gracias a la extensión de los registros (desde 2011 a 2019), a bajos porcentajes de valores vacíos en el registro modal (frecuencia 1: 20.5%, frecuencia 2: 36.9%, frecuencia 3: 24.3%), y a una mayor tasa de muestreo para los registros (cada 15 minutos). Se debe tener en consideración estos

puntos de manera de poder identificar con mayor claridad resultados respecto al desfase de la componente diaria modal.

De los resultados del cálculo del desfase entre componente diarias, se observó que el mecanismo diario asigna distintos valores y mecanismos de desfase según frecuencia modal, y que no se comparte exactamente el mismo mecanismo entre frecuencias. Este hecho contrasta el mecanismo estacional (el cual aparentemente se mantiene idéntico entre frecuencias modales) con el mecanismo diario, el cual si hace distinción entre las distintas frecuencias modales, asignando valores de desfase diferentes para cada una. Es posible que este hecho sea debido a que el mecanismo diario asigne distintos valores de desfase según al tipo de forma modal asociada a cada frecuencia.

Para el cálculo del desfase entre componente diarias, se observó que algunas frecuencias modales presentaban altas magnitudes de desfase diario. En particular, es importante el lugar en donde se registren las medidas la temperatura y humedad, dado que puede afectar en los resultados de desfases obtenidos. Por ejemplo, los registros de temperatura y humedad varían si son tomados al exterior de la estructura o al interior de la estructura, donde estos últimos registros probablemente sean una versión atenuada de los registros del exterior. Esto fue observado en la investigación de (Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenco 2019a) para el caso de la Iglesia de Andahuaylillas. También, existe una gran diferencia entre los registros ambientales y los registros al interior del material de la estructura (mediciones internas), donde principalmente se tiene una atenuación y un desfase entre ambas mediciones. Esto se observó en la investigación de (Zonno, Aguilar, Boroschek, and Lourenço 2019). Por otro lado, se reitera la posibilidad de asumir una respuesta modal proporcional o inversamente proporcional al parámetro ambiental predominante, posiblemente así logrando reducir el valor de desfase. Dado este hecho, se abre la posibilidad que, para una misma estructura, el mecanismo diario pueda presentar una frecuencia modal con comportamiento proporcional, y otra frecuencia modal con comportamiento inversamente proporcional, todo esto independiente del comportamiento que presente la componente estacional de la frecuencia modal (proporcional o inverso). Sin embargo, este hecho no se comprobó en el desarrollo de esta memoria, por lo que se dejará como tema abierto para futuras investigaciones.

El mayor detalle que se debe tener presente al querer aplicar la metodología de análisis por componentes es la presencia de datos vacíos en los registros ambientales y modales, los cuales se deben intentar reducir lo más posible. A mayor presencia de estos vacíos, menor calidad de filtrado se obtendrá, lo que afecta directamente a los resultados que se obtendrán del análisis por componentes. Es posible trabajar con registros con hasta un 35% de datos vacíos sin perder de manera significativa la calidad e información de la señal original. Más allá de este límite imposibilita realizar un análisis diario correctamente (así como el cálculo de desfase entre componentes diarias), limitando el análisis a una comparación entre componentes estacionales.

De las estructuras analizadas, a priori se observa un comportamiento distinto de las frecuencias modales dependiendo del material predominante del sistema estructural (hormigón o albañilería de adobe). Por un lado, dependiendo del material, puede que la componente estacional de la frecuencia modal responda de manera proporcional o inversamente proporcional ante el parámetro ambiental predominante. En Torre Central (hormigón armado), se ve que las frecuencias modales responden inversamente proporcional a la temperatura, mientras que para las Iglesias de Andahuaylillas y Huaro (albañilería de adobe), se presentó un comportamiento proporcional a la humedad absoluta. Estos hechos tientan a asumir que para estructuras de hormigón siempre se verá un comportamiento inverso, mientras que para estructuras de albañilería de adobe siempre será proporcional. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, esto no siempre se cumple (caso del Palacio de Consoli, mencionado en la sección 2.3), lo cual se intenta explicar en base a que el material no es el único factor determinante en este comportamiento, sino que también influye el tipo de estructuración presente en la estructura. Dado esto, no es directo asumir que el material predominante en la estructura es el único causante de un comportamiento proporcional o inverso, por lo que se requiere seguir profundizando esta línea de investigación.

Otro efecto que genera el material del sistema estructural es hacer que la frecuencia modal sea sensible a diferentes parámetros ambientales, según el material. Para estructuras de hormigón armado, se observa sensibilidad de las frecuencias modales ante cambios de temperatura, pero no así para cambios de humedad relativa del aire, debido a que el hormigón (seco) en si es un material resistente a la humedad. Por lo tanto, se considera que, para estructuras de hormigón, la temperatura corresponde a la variable ambiental predominante, lo cual fue comprobado para el caso de Torre Central. Para el caso de estructuras de albañilería de adobe, se tiene que tanto la temperatura ambiental como la humedad relativa del aire afectan el comportamiento de las frecuencias modales de la estructura, por lo que se considera que el factor ambiental predominante de para este tipo de estructuras corresponde a la humedad absoluta, dado que es un parámetro que combina tanto la información de temperatura como de humedad relativa.

Posibles mejoras al trabajo realizado o continuación de líneas de trabajo incluyen:

- a) Realizar un análisis estacional y diario para más tipos de estructuras (más tipos de materiales, distintos tipos de estructuración, etc.), que cuenten con registros con extensión de al menos 2 o 3 años. Esto para poder identificar con certeza las características de la variación producida por los mecanismos del tipo estacional y del tipo diario, y verificar si estas variaciones se mantienen consistentes a través del tiempo
- b) Identificar si el mecanismo de variación diaria puede asignar un comportamiento tanto proporcional como inversamente proporcional a distintas frecuencias modales, para una misma estructura. Esencialmente comprobar que no necesariamente tiene que ser único el comportamiento entre frecuencias modales, y que pueda darse en la misma estructura que una frecuencia modal sea

proporcional a los parámetros ambientales y que otra frecuencia se comporte inversamente proporcional a ellos.

- c) Realizar el mismo análisis de b), pero para el mecanismo estacional.
- d) Realizar algún tipo de comparación de magnitud entre las componentes diarias de frecuencia modal y de medio ambiente.
- e) Incluir el tipo de forma modal asociada a los resultados de cada frecuencia modal, y determinar si la forma modal afecta de alguna manera a los mecanismos estacionales y diarios.
- f) Investigar la factibilidad de predecir valores de frecuencia para la información faltante/vacía de los registros modales. Esto mediante la combinación del método de filtrado de componentes más la aplicación de modelos estadísticos

A modo de cierre, se quiere enfatizar en lo complejo que realmente es el problema que se analizó en esta memoria. Correlacionar registros de frecuencias modales contra registros ambientales es una gran simplificación, dado que el cambio de frecuencia viene dado en parte por las condiciones de temperatura y humedad del mismo material de la estructura (condiciones internas del material), lo que toma en consideración la transferencia de calor desde medio ambiente hacia la estructura, y la humedad presente en el material (en el caso de albañilería). Contar con este tipo de registros para distintas estructuras requiere de mayor instrumentación, lo que se traduce en un mayor costo de instrumentos. El problema es aún más complejo si se toma en cuenta que la estructura no se ve afectada uniformemente por los parámetros ambientales, dado que, por ejemplo, la radiación que recibe un edificio de parte del sol varía de posición según la hora del día, lo que implica que, a ciertas horas, ciertas caras del edificio pueden estar recibiendo calor de la radiación solar, mientras que otras no, lo que genera un gradiente de temperatura no uniforme en el edificio. Dicho esto, la simplificación de correlacionar únicamente datos ambientales y buscar conclusiones generales a partir de esto es una buena solución ante la complejidad global del problema a resolver. Mayores resultados en esta área permitirán mayores avances en el monitoreo de la salud estructural de edificios, así como posibles mejoras en los métodos de identificación modal para edificios.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, Rafael et al. 2019. "Vibration-Based Damage Detection in Historical Adobe Structures: Laboratory and Field Applications." *International Journal of Architectural Heritage* 13(7): 1005–28.
- Albornoz, Basoalto. 2013. "Análisis Del Efecto de Las Condiciones Ambientales En Las Propiedades Modales de Un Edificio de Hormigón Armado." Universidad de Chile.
- Boroschek, Ruben, Felipe Tamayo, and Rafael Aguilar. 2014. "Evaluation of the Environmental Effects on a Medium Rise Building." *7th European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2014 - 2nd European Conference of the Prognostics and Health Management (PHM) Society* 2(c): 2091–98.
- Brigham, E. O., and R. E. Morrow. 1967. "The Fast Fourier Transform." *IEEE Spectrum*.
- Deraemaeker, A., and K. Worden. 2018. "A Comparison of Linear Approaches to Filter out Environmental Effects in Structural Health Monitoring." *Mechanical Systems and Signal Processing* 105: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.11.045>.
- González, Wladimir, Rubén Boroschek, and Joaquín Bilbao. 2019. "Modal Tracking of an Instrumented Building Assisted by Temperature Measurements." *Paper por publicar*.
- Kita, Alban, Nicola Cavalagli, and Filippo Ubertini. 2019. "Temperature Effects on Static and Dynamic Behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy." *Mechanical Systems and Signal Processing* 120: 180–202. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.10.021>.
- Milton, Rick. 2017. "Evaluación de La Influencia de Los Factores Ambientales En Las Propiedades Dinámicas de Sistemas Estructurales de Tierra."
- De Roeck, Guido, Bart Peeters, and J. Maeck. 2010. "Dynamic Monitoring Of Civil Engineering Structures." *Computational Methods for Shell and Spatial Structures IASS-AICM*.
- Seramhi. 2020. "Datos Hidrometeorológicos En Cusco." <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=cusco&p=estaciones> (February 26, 2020).
- Zonno, Giacomo, Rafael Aguilar, Rubén Boroschek, and Paulo Lourenco. 2019a. "Analysis of the Long and Short-Term Effects of Temperature and Humidity on the Structural Properties of Adobe Buildings Using Structural Health Monitoring." *Engineering Structures* 196: 1–21.
- . 2019b. "Environmental and Ambient Vibration Monitoring of Historical Adobe Buildings: Applications in Emblematic Andean Churches." *International Journal of Architectural Heritage*: 1–17.
- Zonno, Giacomo, Rafael Aguilar, Rubén Boroschek, and Paulo B. Lourenço. 2018. "Automated Long-Term Dynamic Monitoring Using Hierarchical Clustering and Adaptive Modal Tracking: Validation and Applications." *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 8(5): 791–808.
- . 2019. "Experimental Analysis of the Thermohygrometric Effects on the Dynamic Behavior of Adobe Systems." *Construction and Building Materials* 208: 158–74. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.140>.



## ANEXOS

### A. Anexos Capitulo 3

#### A.3.1. Registros de Lluvia - Torre Central

1 - 08-Apr-2011 23:00:00 hasta 10-Apr-2011 02:30:00 (1.15 dias)  
2 - 21-Apr-2011 11:00:00 hasta 22-Apr-2011 16:30:00 (1.23 dias)  
3 - 04-Jun-2011 19:45:00 hasta 06-Jun-2011 02:00:00 (1.26 dias)  
4 - 17-Jun-2011 12:15:00 hasta 18-Jun-2011 22:30:00 (1.43 dias)  
5 - 20-Jun-2011 04:30:00 hasta 21-Jun-2011 07:15:00 (1.11 dias)  
6 - 28-Jun-2011 14:30:00 hasta 30-Jun-2011 00:15:00 (1.41 dias)  
7 - 13-Jul-2011 19:30:00 hasta 16-Jul-2011 06:30:00 (2.46 dias)  
8 - 24-Jul-2011 02:15:00 hasta 25-Jul-2011 08:45:00 (1.27 dias)  
9 - 29-Jul-2011 17:00:00 hasta 30-Jul-2011 22:30:00 (1.23 dias)  
10 - 06-Aug-2011 15:45:00 hasta 07-Aug-2011 17:45:00 (1.08 dias)  
11 - 14-Aug-2011 23:45:00 hasta 16-Aug-2011 02:45:00 (1.13 dias)  
12 - 17-Aug-2011 07:45:00 hasta 18-Aug-2011 14:45:00 (1.29 dias)  
13 - 26-Aug-2011 02:00:00 hasta 27-Aug-2011 04:15:00 (1.09 dias)  
14 - 27-Aug-2011 18:45:00 hasta 28-Aug-2011 19:30:00 (1.03 dias)  
15 - 02-Sep-2011 22:45:00 hasta 03-Sep-2011 23:15:00 (1.02 dias)  
16 - 21-Sep-2011 07:15:00 hasta 22-Sep-2011 07:30:00 (1.01 dias)  
17 - 13-Oct-2011 04:00:00 hasta 14-Oct-2011 06:15:00 (1.09 dias)  
18 - 13-Apr-2012 17:15:00 hasta 14-Apr-2012 17:45:00 (1.02 dias)  
19 - 27-Apr-2012 10:45:00 hasta 28-Apr-2012 18:00:00 (1.3 dias)  
20 - 25-May-2012 17:45:00 hasta 28-May-2012 14:00:00 (2.84 dias)  
21 - 12-Jun-2012 08:15:00 hasta 14-Jun-2012 11:00:00 (2.11 dias)  
22 - 16-Jun-2012 20:30:00 hasta 18-Jun-2012 20:30:00 (2 dias)  
23 - 20-Jun-2012 20:15:00 hasta 21-Jun-2012 21:30:00 (1.05 dias)  
24 - 28-Jun-2012 13:30:00 hasta 30-Jun-2012 20:30:00 (2.29 dias)  
25 - 30-Jun-2012 23:30:00 hasta 03-Jul-2012 02:45:00 (2.14 dias)  
26 - 04-Jul-2012 17:45:00 hasta 05-Jul-2012 18:00:00 (1.01 dias)  
27 - 02-Aug-2012 15:45:00 hasta 03-Aug-2012 16:00:00 (1.01 dias)  
28 - 14-Aug-2012 12:45:00 hasta 15-Aug-2012 13:00:00 (1.01 dias)  
29 - 15-Aug-2012 21:15:00 hasta 18-Aug-2012 09:15:00 (2.5 dias)  
30 - 22-Aug-2012 15:45:00 hasta 24-Aug-2012 09:15:00 (1.73 dias)  
31 - 06-Sep-2012 02:30:00 hasta 07-Sep-2012 02:45:00 (1.01 dias)  
32 - 06-Oct-2012 08:00:00 hasta 08-Oct-2012 23:15:00 (2.64 dias)  
33 - 21-Oct-2012 20:00:00 hasta 23-Oct-2012 01:45:00 (1.24 dias)  
34 - 19-Dec-2012 14:15:00 hasta 20-Dec-2012 20:45:00 (1.27 dias)  
35 - 01-May-2013 23:45:00 hasta 03-May-2013 06:30:00 (1.28 dias)  
36 - 16-May-2013 23:00:00 hasta 18-May-2013 19:45:00 (1.86 dias)  
37 - 26-May-2013 12:15:00 hasta 28-May-2013 21:15:00 (2.38 dias)  
38 - 30-May-2013 07:15:00 hasta 31-May-2013 09:30:00 (1.09 dias)  
39 - 22-Jun-2013 05:45:00 hasta 23-Jun-2013 06:00:00 (1.01 dias)  
40 - 26-Jun-2013 13:45:00 hasta 28-Jun-2013 13:30:00 (1.99 dias)  
41 - 04-Jul-2013 12:30:00 hasta 05-Jul-2013 15:45:00 (1.14 dias)  
42 - 19-Jul-2013 20:30:00 hasta 20-Jul-2013 22:00:00 (1.06 dias)  
43 - 06-Aug-2013 06:15:00 hasta 07-Aug-2013 22:30:00 (1.68 dias)  
44 - 11-Aug-2013 10:00:00 hasta 12-Aug-2013 10:15:00 (1.01 dias)  
45 - 01-Sep-2013 16:30:00 hasta 02-Sep-2013 18:00:00 (1.06 dias)  
46 - 06-Sep-2013 01:00:00 hasta 07-Sep-2013 02:00:00 (1.04 dias)  
47 - 20-Sep-2013 08:30:00 hasta 21-Sep-2013 10:30:00 (1.08 dias)  
48 - 10-Apr-2014 15:00:00 hasta 11-Apr-2014 15:15:00 (1.01 dias)  
49 - 02-May-2014 05:45:00 hasta 03-May-2014 06:00:00 (1.01 dias)

50 - 20-May-2014 01:15:00 hasta 21-May-2014 20:30:00 (1.8 dias)  
51 - 02-Jun-2014 17:15:00 hasta 04-Jun-2014 02:15:00 (1.38 dias)  
52 - 05-Jun-2014 21:00:00 hasta 08-Jun-2014 17:45:00 (2.86 dias)  
53 - 10-Jun-2014 20:00:00 hasta 12-Jun-2014 14:00:00 (1.75 dias)  
54 - 01-Jul-2014 06:30:00 hasta 02-Jul-2014 09:00:00 (1.1 dias)  
55 - 13-Jul-2014 14:45:00 hasta 14-Jul-2014 22:45:00 (1.33 dias)  
56 - 05-Aug-2014 06:15:00 hasta 06-Aug-2014 10:45:00 (1.19 dias)  
57 - 22-Aug-2014 12:45:00 hasta 24-Aug-2014 00:15:00 (1.48 dias)  
58 - 29-Aug-2014 06:30:00 hasta 30-Aug-2014 08:15:00 (1.07 dias)  
59 - 31-Aug-2014 12:30:00 hasta 01-Sep-2014 15:30:00 (1.13 dias)  
60 - 02-Sep-2014 16:00:00 hasta 03-Sep-2014 16:15:00 (1.01 dias)  
61 - 04-Sep-2014 06:00:00 hasta 05-Sep-2014 09:45:00 (1.16 dias)  
62 - 12-Sep-2014 11:45:00 hasta 13-Sep-2014 19:15:00 (1.31 dias)  
63 - 28-Nov-2014 14:30:00 hasta 29-Nov-2014 18:15:00 (1.16 dias)  
64 - 19-Dec-2014 18:30:00 hasta 20-Dec-2014 19:00:00 (1.02 dias)  
65 - 28-Feb-2015 06:15:00 hasta 01-Mar-2015 06:30:00 (1.01 dias)  
66 - 23-Mar-2015 05:45:00 hasta 24-Mar-2015 07:45:00 (1.08 dias)  
67 - 25-Mar-2015 00:00:00 hasta 26-Mar-2015 05:00:00 (1.21 dias)  
68 - 01-May-2015 02:45:00 hasta 02-May-2015 03:00:00 (1.01 dias)  
69 - 04-Jul-2015 15:00:00 hasta 05-Jul-2015 16:00:00 (1.04 dias)  
70 - 10-Jul-2015 17:15:00 hasta 12-Jul-2015 20:15:00 (2.13 dias)  
71 - 29-Jul-2015 20:45:00 hasta 30-Jul-2015 22:30:00 (1.07 dias)  
72 - 01-Aug-2015 05:45:00 hasta 02-Aug-2015 06:00:00 (1.01 dias)  
73 - 04-Aug-2015 12:45:00 hasta 08-Aug-2015 10:45:00 (3.92 dias)  
74 - 08-Aug-2015 15:30:00 hasta 10-Aug-2015 00:00:00 (1.35 dias)  
75 - 11-Aug-2015 09:00:00 hasta 12-Aug-2015 12:30:00 (1.15 dias)  
76 - 05-Sep-2015 04:15:00 hasta 07-Sep-2015 19:30:00 (2.64 dias)  
77 - 23-Sep-2015 04:00:00 hasta 24-Sep-2015 15:00:00 (1.46 dias)  
78 - 30-Sep-2015 09:00:00 hasta 01-Oct-2015 21:00:00 (1.5 dias)  
79 - 13-Oct-2015 02:15:00 hasta 14-Oct-2015 19:00:00 (1.7 dias)  
80 - 18-Oct-2015 06:15:00 hasta 19-Oct-2015 19:00:00 (1.53 dias)  
81 - 10-Nov-2015 23:15:00 hasta 12-Nov-2015 01:00:00 (1.07 dias)  
82 - 24-Jan-2016 00:30:00 hasta 25-Jan-2016 06:00:00 (1.23 dias)  
83 - 03-Mar-2016 13:00:00 hasta 04-Mar-2016 13:15:00 (1.01 dias)  
84 - 05-Apr-2016 15:45:00 hasta 06-Apr-2016 19:45:00 (1.17 dias)  
85 - 14-Apr-2016 08:15:00 hasta 19-Apr-2016 10:15:00 (5.08 dias)  
86 - 23-Apr-2016 18:15:00 hasta 25-Apr-2016 18:15:00 (2 dias)  
87 - 11-May-2016 14:00:00 hasta 12-May-2016 15:45:00 (1.07 dias)  
88 - 19-May-2016 02:30:00 hasta 20-May-2016 04:00:00 (1.06 dias)  
89 - 20-May-2016 19:15:00 hasta 21-May-2016 19:45:00 (1.02 dias)  
90 - 29-May-2016 00:15:00 hasta 30-May-2016 20:00:00 (1.82 dias)  
91 - 02-Jun-2016 13:15:00 hasta 05-Jun-2016 06:15:00 (2.71 dias)  
92 - 13-Jun-2016 01:00:00 hasta 14-Jun-2016 01:15:00 (1.01 dias)  
93 - 10-Jul-2016 22:45:00 hasta 12-Jul-2016 09:45:00 (1.46 dias)  
94 - 13-Jul-2016 15:15:00 hasta 15-Jul-2016 05:30:00 (1.59 dias)  
95 - 24-Jul-2016 20:00:00 hasta 26-Jul-2016 12:45:00 (1.7 dias)  
96 - 15-Oct-2016 14:15:00 hasta 17-Oct-2016 11:15:00 (1.88 dias)  
97 - 04-Dec-2016 05:45:00 hasta 05-Dec-2016 06:00:00 (1.01 dias)  
98 - 09-Dec-2016 00:45:00 hasta 10-Dec-2016 17:00:00 (1.68 dias)  
99 - 26-Dec-2016 02:45:00 hasta 27-Dec-2016 10:30:00 (1.32 dias)  
100 - 26-Feb-2017 06:45:00 hasta 27-Feb-2017 07:00:00 (1.01 dias)  
101 - 20-Apr-2017 03:15:00 hasta 21-Apr-2017 14:45:00 (1.48 dias)  
102 - 07-May-2017 23:30:00 hasta 09-May-2017 05:15:00 (1.24 dias)  
103 - 10-May-2017 11:30:00 hasta 12-May-2017 21:00:00 (2.4 dias)  
104 - 18-May-2017 01:30:00 hasta 19-May-2017 09:30:00 (1.33 dias)  
105 - 25-May-2017 03:30:00 hasta 26-May-2017 09:30:00 (1.25 dias)  
106 - 07-Jun-2017 20:30:00 hasta 09-Jun-2017 04:00:00 (1.31 dias)

107 - 16-Jun-2017 03:45:00 hasta 28-Jun-2017 18:30:00 (12.61 dias)  
 108 - 04-Jul-2017 08:45:00 hasta 05-Jul-2017 12:15:00 (1.15 dias)  
 109 - 13-Jul-2017 08:15:00 hasta 14-Jul-2017 11:00:00 (1.11 dias)  
 110 - 15-Jul-2017 02:45:00 hasta 16-Jul-2017 10:30:00 (1.32 dias)  
 111 - 10-Aug-2017 04:15:00 hasta 12-Aug-2017 20:15:00 (2.67 dias)  
 112 - 18-Aug-2017 21:45:00 hasta 20-Aug-2017 02:15:00 (1.19 dias)  
 113 - 28-Aug-2017 21:30:00 hasta 30-Aug-2017 03:45:00 (1.26 dias)  
 114 - 10-Sep-2017 08:30:00 hasta 11-Sep-2017 16:45:00 (1.34 dias)  
 115 - 30-Sep-2017 09:45:00 hasta 01-Oct-2017 16:45:00 (1.29 dias)  
 116 - 04-Oct-2017 21:15:00 hasta 06-Oct-2017 04:30:00 (1.3 dias)  
 117 - 18-Mar-2018 03:45:00 hasta 19-Mar-2018 04:15:00 (1.02 dias)  
 118 - 29-May-2018 09:00:00 hasta 30-May-2018 16:15:00 (1.3 dias)  
 119 - 09-Jun-2018 19:45:00 hasta 12-Jun-2018 17:45:00 (2.92 dias)  
 120 - 24-Jun-2018 06:30:00 hasta 25-Jun-2018 06:45:00 (1.01 dias)  
 121 - 01-Jul-2018 13:30:00 hasta 02-Jul-2018 22:30:00 (1.38 dias)  
 122 - 04-Jul-2018 14:15:00 hasta 07-Jul-2018 14:00:00 (2.99 dias)  
 123 - 27-Jul-2018 09:30:00 hasta 28-Jul-2018 13:30:00 (1.17 dias)  
 124 - 07-Aug-2018 04:00:00 hasta 08-Aug-2018 07:00:00 (1.13 dias)  
 125 - 23-Aug-2018 08:00:00 hasta 24-Aug-2018 09:00:00 (1.04 dias)  
 126 - 18-Sep-2018 00:30:00 hasta 19-Sep-2018 16:00:00 (1.65 dias)  
 127 - 29-Sep-2018 04:30:00 hasta 30-Sep-2018 07:00:00 (1.1 dias)  
 128 - 30-Oct-2018 06:15:00 hasta 31-Oct-2018 06:45:00 (1.02 dias)  
 129 - 12-Nov-2018 18:45:00 hasta 13-Nov-2018 19:00:00 (1.01 dias)  
 130 - 04-Dec-2018 08:30:00 hasta 05-Dec-2018 12:30:00 (1.17 dias)  
 131 - 31-Mar-2019 05:00:00 hasta 01-Apr-2019 05:30:00 (1.02 dias)  
 132 - 24-Apr-2019 17:00:00 hasta 25-Apr-2019 17:15:00 (1.01 dias)  
 133 - 29-May-2019 18:15:00 hasta 31-May-2019 22:30:00 (2.18 dias)  
 134 - 13-Jun-2019 03:30:00 hasta 14-Jun-2019 17:30:00 (1.58 dias)  
 135 - 15-Jun-2019 04:15:00 hasta 16-Jun-2019 05:00:00 (1.03 dias)  
 136 - 24-Jun-2019 15:45:00 hasta 25-Jun-2019 19:00:00 (1.14 dias)  
 137 - 29-Jun-2019 02:15:00 hasta 30-Jun-2019 06:30:00 (1.18 dias)  
 138 - 21-Jul-2019 12:00:00 hasta 22-Jul-2019 18:15:00 (1.26 dias)  
 139 - 28-Jul-2019 22:30:00 hasta 30-Jul-2019 01:00:00 (1.1 dias)

### **A.3.2. Registros de Lluvia - Iglesia Andahuaylillas**

1 - 03-Jun-2017 00:00:00 hasta 04-Jun-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
 2 - 05-Jun-2017 00:00:00 hasta 06-Jun-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
 3 - 11-Aug-2017 00:00:00 hasta 12-Aug-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
 4 - 17-Aug-2017 00:00:00 hasta 19-Aug-2017 01:00:00 (2.04 dias)  
 5 - 07-Sep-2017 00:00:00 hasta 08-Sep-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
 6 - 17-Sep-2017 00:00:00 hasta 19-Sep-2017 01:00:00 (2.04 dias)  
 7 - 24-Sep-2017 00:00:00 hasta 25-Sep-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
 8 - 26-Sep-2017 00:00:00 hasta 28-Sep-2017 01:00:00 (2.04 dias)  
 9 - 07-Oct-2017 00:00:00 hasta 09-Oct-2017 01:00:00 (2.04 dias)  
 10 - 13-Oct-2017 00:00:00 hasta 16-Oct-2017 01:00:00 (3.04 dias)  
 11 - 18-Oct-2017 00:00:00 hasta 19-Oct-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
 12 - 20-Oct-2017 00:00:00 hasta 21-Oct-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
 13 - 25-Oct-2017 00:00:00 hasta 26-Oct-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
 14 - 27-Oct-2017 00:00:00 hasta 30-Oct-2017 01:00:00 (3.04 dias)  
 15 - 04-Nov-2017 00:00:00 hasta 05-Nov-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
 16 - 06-Nov-2017 00:00:00 hasta 07-Nov-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
 17 - 08-Nov-2017 00:00:00 hasta 09-Nov-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
 18 - 10-Nov-2017 00:00:00 hasta 15-Nov-2017 01:00:00 (5.04 dias)

19 - 17-Nov-2017 00:00:00 hasta 21-Nov-2017 01:00:00 (4.04 dias)  
20 - 29-Nov-2017 00:00:00 hasta 30-Nov-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
21 - 02-Dec-2017 00:00:00 hasta 06-Dec-2017 01:00:00 (4.04 dias)  
22 - 09-Dec-2017 00:00:00 hasta 10-Dec-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
23 - 14-Dec-2017 00:00:00 hasta 15-Dec-2017 01:00:00 (1.04 dias)  
24 - 18-Dec-2017 00:00:00 hasta 20-Dec-2017 01:00:00 (2.04 dias)  
25 - 21-Dec-2017 00:00:00 hasta 25-Dec-2017 01:00:00 (4.04 dias)  
26 - 26-Dec-2017 00:00:00 hasta 31-Dec-2017 01:00:00 (5.04 dias)  
27 - 01-Jan-2018 00:00:00 hasta 07-Jan-2018 01:00:00 (6.04 dias)  
28 - 10-Jan-2018 00:00:00 hasta 11-Jan-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
29 - 12-Jan-2018 00:00:00 hasta 15-Jan-2018 01:00:00 (3.04 dias)  
30 - 17-Jan-2018 00:00:00 hasta 22-Jan-2018 01:00:00 (5.04 dias)  
31 - 23-Jan-2018 00:00:00 hasta 25-Jan-2018 01:00:00 (2.04 dias)  
32 - 26-Jan-2018 00:00:00 hasta 27-Jan-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
33 - 01-Feb-2018 00:00:00 hasta 03-Feb-2018 01:00:00 (2.04 dias)  
34 - 04-Feb-2018 00:00:00 hasta 05-Feb-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
35 - 07-Feb-2018 00:00:00 hasta 11-Feb-2018 01:00:00 (4.04 dias)  
36 - 14-Feb-2018 00:00:00 hasta 19-Feb-2018 01:00:00 (5.04 dias)  
37 - 20-Feb-2018 00:00:00 hasta 26-Feb-2018 01:26:00 (6.06 dias)  
38 - 27-Feb-2018 00:00:00 hasta 28-Feb-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
39 - 02-Mar-2018 00:00:00 hasta 03-Mar-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
40 - 04-Mar-2018 00:00:00 hasta 17-Mar-2018 01:00:00 (13.04 dias)  
41 - 18-Mar-2018 00:00:00 hasta 19-Mar-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
42 - 20-Mar-2018 00:00:00 hasta 23-Mar-2018 01:00:00 (3.04 dias)  
43 - 24-Mar-2018 00:00:00 hasta 25-Mar-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
44 - 28-Mar-2018 00:00:00 hasta 31-Mar-2018 01:00:00 (3.04 dias)  
45 - 07-Apr-2018 00:00:00 hasta 08-Apr-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
46 - 12-Apr-2018 00:00:00 hasta 14-Apr-2018 01:00:00 (2.04 dias)  
47 - 17-Apr-2018 00:00:00 hasta 19-Apr-2018 01:00:00 (2.04 dias)  
48 - 22-Apr-2018 00:00:00 hasta 24-Apr-2018 01:00:00 (2.04 dias)  
49 - 26-Apr-2018 00:00:00 hasta 27-Apr-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
50 - 28-Apr-2018 00:00:00 hasta 30-Apr-2018 01:00:00 (2.04 dias)  
51 - 01-May-2018 00:00:00 hasta 02-May-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
52 - 02-Jun-2018 00:00:00 hasta 04-Jun-2018 01:00:00 (2.04 dias)  
53 - 09-Jun-2018 00:00:00 hasta 12-Jun-2018 01:00:00 (3.04 dias)  
54 - 13-Jun-2018 00:00:00 hasta 14-Jun-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
55 - 19-Jul-2018 00:00:00 hasta 22-Jul-2018 01:00:00 (3.04 dias)  
56 - 02-Aug-2018 00:00:00 hasta 03-Aug-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
57 - 05-Aug-2018 00:00:00 hasta 07-Aug-2018 01:00:00 (2.04 dias)  
58 - 08-Aug-2018 00:00:00 hasta 09-Aug-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
59 - 12-Aug-2018 00:00:00 hasta 13-Aug-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
60 - 19-Aug-2018 00:00:00 hasta 20-Aug-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
61 - 21-Aug-2018 00:00:00 hasta 22-Aug-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
62 - 08-Sep-2018 00:00:00 hasta 09-Sep-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
63 - 16-Sep-2018 00:00:00 hasta 17-Sep-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
64 - 25-Sep-2018 00:00:00 hasta 28-Sep-2018 01:00:00 (3.04 dias)  
65 - 07-Oct-2018 00:00:00 hasta 08-Oct-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
66 - 10-Oct-2018 00:00:00 hasta 13-Oct-2018 01:00:00 (3.04 dias)  
67 - 14-Oct-2018 00:00:00 hasta 17-Oct-2018 01:00:00 (3.04 dias)  
68 - 19-Oct-2018 00:00:00 hasta 21-Oct-2018 01:00:00 (2.04 dias)  
69 - 22-Oct-2018 00:00:00 hasta 26-Oct-2018 01:00:00 (4.04 dias)  
70 - 27-Oct-2018 00:00:00 hasta 28-Oct-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
71 - 30-Oct-2018 00:00:00 hasta 31-Oct-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
72 - 01-Nov-2018 00:00:00 hasta 04-Nov-2018 01:00:00 (3.04 dias)  
73 - 05-Nov-2018 00:00:00 hasta 06-Nov-2018 01:00:00 (1.04 dias)  
74 - 07-Nov-2018 00:00:00 hasta 10-Nov-2018 01:00:00 (3.04 dias)  
75 - 11-Nov-2018 00:00:00 hasta 12-Nov-2018 01:00:00 (1.04 dias)

76 - 14-Nov-2018 00:00:00 hasta 17-Nov-2018 01:00:00 (3.04 días)  
77 - 18-Nov-2018 00:00:00 hasta 19-Nov-2018 01:00:00 (1.04 días)  
78 - 20-Nov-2018 00:00:00 hasta 22-Nov-2018 01:00:00 (2.04 días)  
79 - 26-Nov-2018 00:00:00 hasta 27-Nov-2018 13:00:00 (1.54 días)

### **A.3.3. Registros de Lluvia – Iglesia de Huaro**

1 - 28-Apr-2017 00:00:00 hasta 29-Apr-2017 01:00:00 (1.04 días)  
2 - 13-May-2017 00:00:00 hasta 14-May-2017 01:00:00 (1.04 días)  
3 - 15-May-2017 00:00:00 hasta 16-May-2017 01:00:00 (1.04 días)  
4 - 22-May-2017 00:00:00 hasta 27-May-2017 01:00:00 (5.04 días)  
5 - 03-Jun-2017 00:00:00 hasta 04-Jun-2017 01:00:00 (1.04 días)  
6 - 17-Aug-2017 00:00:00 hasta 18-Aug-2017 01:00:00 (1.04 días)  
7 - 12-Sep-2017 00:04:00 hasta 14-Sep-2017 01:04:00 (2.04 días)  
8 - 24-Sep-2017 00:00:00 hasta 25-Sep-2017 01:00:00 (1.04 días)  
9 - 27-Sep-2017 00:00:00 hasta 28-Sep-2017 01:00:00 (1.04 días)  
10 - 08-Oct-2017 00:01:00 hasta 09-Oct-2017 01:01:00 (1.04 días)  
11 - 14-Oct-2017 00:03:00 hasta 16-Oct-2017 01:04:00 (2.04 días)  
12 - 18-Oct-2017 00:04:00 hasta 19-Oct-2017 01:04:00 (1.04 días)  
13 - 20-Oct-2017 00:04:00 hasta 21-Oct-2017 01:05:00 (1.04 días)  
14 - 23-Oct-2017 00:05:00 hasta 24-Oct-2017 01:05:00 (1.04 días)  
15 - 25-Oct-2017 00:05:00 hasta 26-Oct-2017 01:06:00 (1.04 días)  
16 - 27-Oct-2017 00:06:00 hasta 28-Oct-2017 01:06:00 (1.04 días)  
17 - 04-Nov-2017 00:08:00 hasta 05-Nov-2017 01:08:00 (1.04 días)  
18 - 06-Nov-2017 00:08:00 hasta 08-Nov-2017 01:09:00 (2.04 días)  
19 - 09-Nov-2017 00:09:00 hasta 13-Nov-2017 01:10:00 (4.04 días)  
20 - 14-Nov-2017 00:10:00 hasta 15-Nov-2017 01:10:00 (1.04 días)  
21 - 17-Nov-2017 00:10:00 hasta 20-Nov-2017 01:11:00 (3.04 días)  
22 - 29-Nov-2017 00:14:00 hasta 30-Nov-2017 01:14:00 (1.04 días)  
23 - 02-Dec-2017 00:15:00 hasta 06-Dec-2017 01:15:00 (4.04 días)  
24 - 08-Dec-2017 00:16:00 hasta 09-Dec-2017 01:00:00 (1.03 días)  
25 - 18-Dec-2017 00:03:00 hasta 19-Dec-2017 01:00:00 (1.04 días)  
26 - 21-Dec-2017 00:00:00 hasta 22-Dec-2017 01:01:00 (1.04 días)  
27 - 23-Dec-2017 00:01:00 hasta 25-Dec-2017 01:01:00 (2.04 días)  
28 - 28-Dec-2017 00:01:00 hasta 09-Jan-2018 01:00:00 (12.04 días)  
29 - 10-Jan-2018 00:00:00 hasta 15-Jan-2018 01:01:00 (5.04 días)  
30 - 17-Jan-2018 00:02:00 hasta 22-Jan-2018 01:02:00 (5.04 días)  
31 - 23-Jan-2018 00:02:00 hasta 24-Jan-2018 01:03:00 (1.04 días)  
32 - 26-Jan-2018 00:03:00 hasta 27-Jan-2018 01:03:00 (1.04 días)  
33 - 01-Feb-2018 00:04:00 hasta 03-Feb-2018 01:00:00 (2.04 días)  
34 - 03-Feb-2018 23:50:00 hasta 05-Feb-2018 01:01:00 (1.05 días)  
35 - 07-Feb-2018 00:01:00 hasta 11-Feb-2018 00:56:00 (4.04 días)  
36 - 12-Feb-2018 23:56:00 hasta 17-Feb-2018 00:56:00 (4.04 días)  
37 - 17-Feb-2018 23:56:00 hasta 19-Feb-2018 00:56:00 (1.04 días)  
38 - 19-Feb-2018 23:56:00 hasta 25-Feb-2018 00:56:00 (5.04 días)  
39 - 25-Feb-2018 23:56:00 hasta 27-Feb-2018 00:56:00 (1.04 días)  
40 - 27-Feb-2018 23:56:00 hasta 01-Mar-2018 00:56:00 (1.04 días)  
41 - 01-Mar-2018 23:56:00 hasta 03-Mar-2018 00:56:00 (1.04 días)  
42 - 03-Mar-2018 23:56:00 hasta 05-Mar-2018 00:56:00 (1.04 días)  
43 - 05-Mar-2018 23:56:00 hasta 07-Mar-2018 00:56:00 (1.04 días)

44 - 07-Mar-2018 23:56:00 hasta 17-Mar-2018 00:56:00 (9.04 días)  
45 - 17-Mar-2018 23:56:00 hasta 21-Mar-2018 00:56:00 (3.04 días)  
46 - 21-Mar-2018 23:56:00 hasta 23-Mar-2018 00:56:00 (1.04 días)  
47 - 28-Mar-2018 00:00:00 hasta 31-Mar-2018 01:00:00 (3.04 días)  
48 - 05-Apr-2018 00:00:00 hasta 06-Apr-2018 01:00:00 (1.04 días)  
49 - 07-Apr-2018 00:00:00 hasta 08-Apr-2018 01:00:00 (1.04 días)  
50 - 12-Apr-2018 00:00:00 hasta 14-Apr-2018 01:00:00 (2.04 días)  
51 - 26-Apr-2018 00:00:00 hasta 27-Apr-2018 01:00:00 (1.04 días)  
52 - 28-Apr-2018 00:00:00 hasta 30-Apr-2018 01:00:00 (2.04 días)  
53 - 12-May-2018 00:00:00 hasta 13-May-2018 01:00:00 (1.04 días)  
54 - 02-Jun-2018 00:00:00 hasta 04-Jun-2018 01:00:00 (2.04 días)  
55 - 09-Jun-2018 00:00:00 hasta 11-Jun-2018 01:00:00 (2.04 días)  
56 - 12-Jun-2018 00:00:00 hasta 14-Jun-2018 01:00:00 (2.04 días)  
57 - 20-Jul-2018 00:00:00 hasta 22-Jul-2018 01:00:00 (2.04 días)  
58 - 23-Jul-2018 00:00:00 hasta 24-Jul-2018 01:00:00 (1.04 días)  
59 - 03-Aug-2018 00:00:00 hasta 05-Aug-2018 01:00:00 (2.04 días)  
60 - 06-Aug-2018 00:00:00 hasta 07-Aug-2018 01:00:00 (1.04 días)  
61 - 08-Aug-2018 00:00:00 hasta 09-Aug-2018 01:00:00 (1.04 días)  
62 - 21-Aug-2018 00:00:00 hasta 22-Aug-2018 01:00:00 (1.04 días)  
63 - 25-Sep-2018 00:00:00 hasta 27-Sep-2018 01:00:00 (2.04 días)  
64 - 07-Oct-2018 00:01:00 hasta 08-Oct-2018 01:01:00 (1.04 días)  
65 - 10-Oct-2018 00:01:00 hasta 13-Oct-2018 01:02:00 (3.04 días)  
66 - 14-Oct-2018 00:02:00 hasta 17-Oct-2018 01:02:00 (3.04 días)  
67 - 19-Oct-2018 00:02:00 hasta 21-Oct-2018 01:02:00 (2.04 días)  
68 - 22-Oct-2018 00:02:00 hasta 28-Oct-2018 01:03:00 (6.04 días)  
69 - 29-Oct-2018 00:03:00 hasta 31-Oct-2018 01:03:00 (2.04 días)  
70 - 02-Nov-2018 00:03:00 hasta 03-Nov-2018 01:04:00 (1.04 días)  
71 - 05-Nov-2018 00:04:00 hasta 09-Nov-2018 01:04:00 (4.04 días)  
72 - 15-Nov-2018 00:05:00 hasta 16-Nov-2018 01:05:00 (1.04 días)  
73 - 19-Nov-2018 00:05:00 hasta 22-Nov-2018 01:05:00 (3.04 días)  
74 - 26-Nov-2018 00:00:00 hasta 27-Nov-2018 13:00:00 (1.54 días)

## B. Anexos Capitulo 4

### A.4.1. Torre Central – Componentes temperatura ambiental

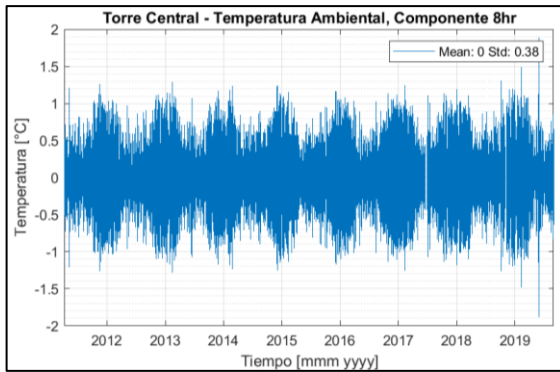


Figura 0.1: Torre Central, temperatura, Comp. 8 hrs.

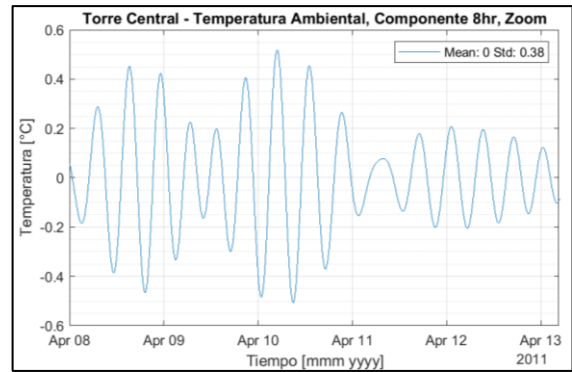


Figura 0.2: Torre Central, temperatura, Comp. 8 hrs (zoom diario).

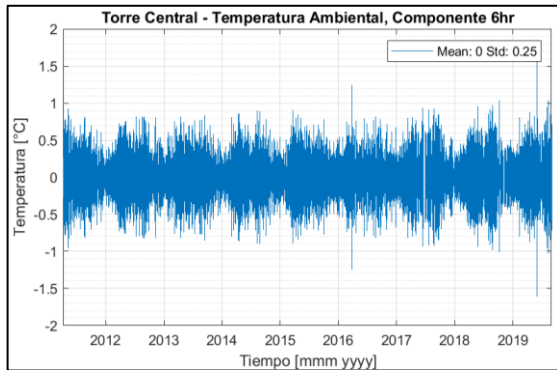


Figura 0.3: Torre Central, temperatura, Comp. 6 hrs.

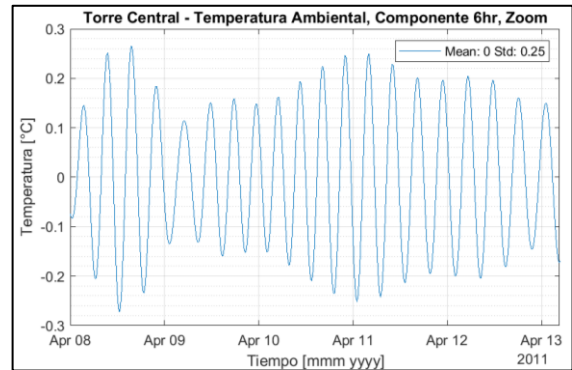


Figura 0.4: Torre Central, temperatura, Comp. 6 hrs (zoom diario).

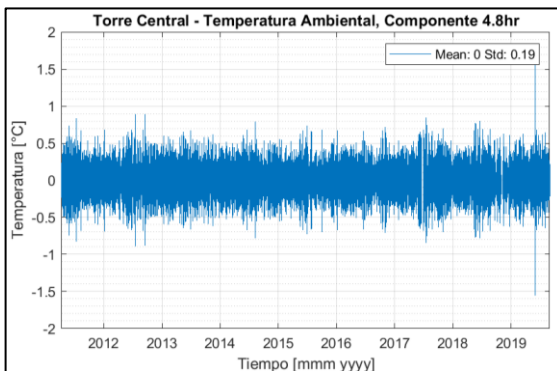


Figura 0.5: Torre Central, temperatura, Comp. 4.8 hrs.

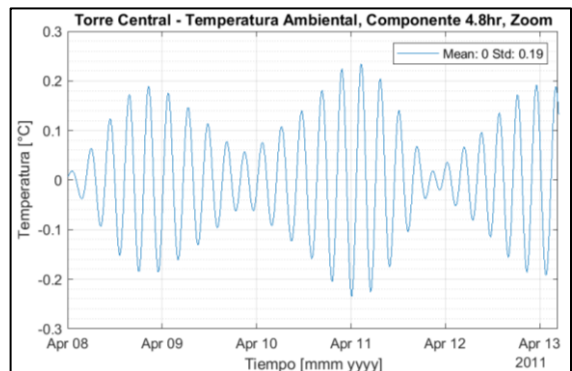


Figura 0.6: Torre Central, temperatura, Comp. 4.8 hrs (zoom diario).

## A.4.2. Torre Central – Componentes humedad absoluta

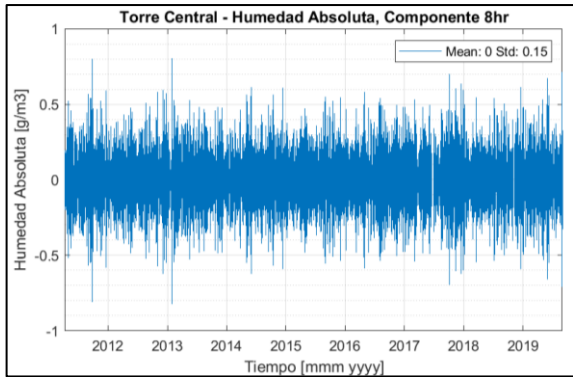


Figura 0.7: Torre Central, humedad absoluta, Comp. 8 hrs.

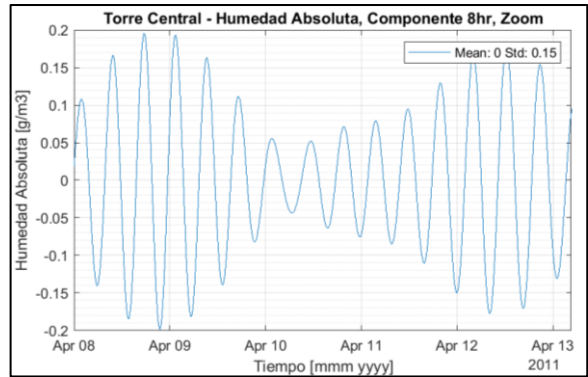


Figura 0.8: Torre Central, humedad absoluta, Comp. 8 hrs (zoom diario).

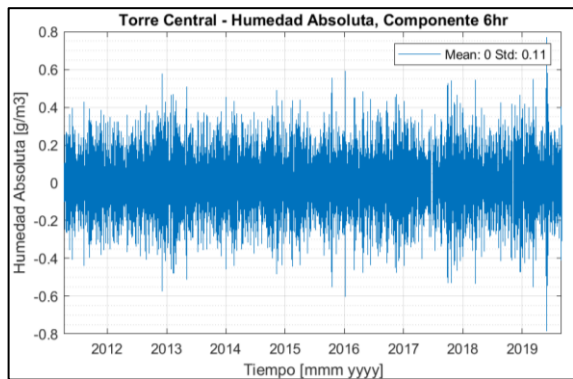


Figura 0.9: Torre Central, humedad absoluta, Comp. 6 hrs.

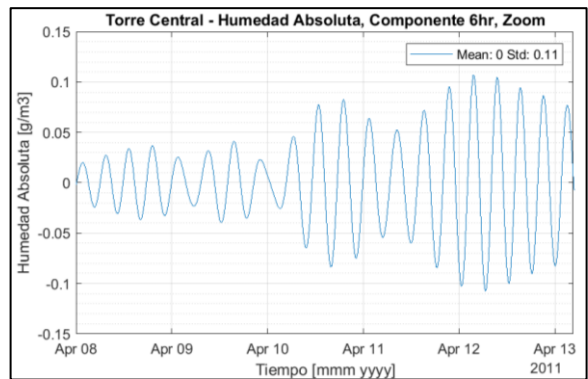


Figura 0.10: Torre Central, humedad absoluta, Comp. 6 hrs (zoom diario).

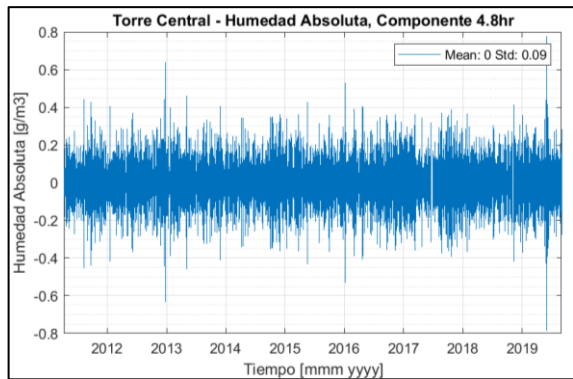


Figura 0.11: Torre Central, humedad absoluta, Comp. 4.8 hrs.

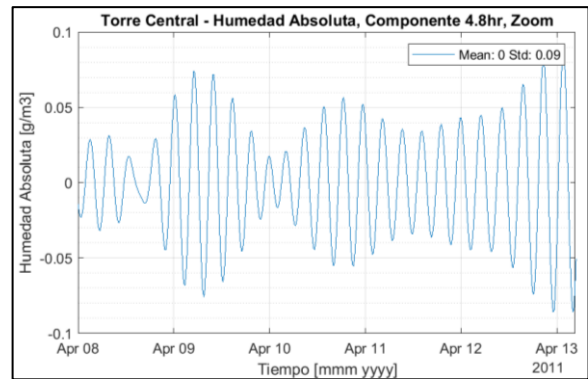
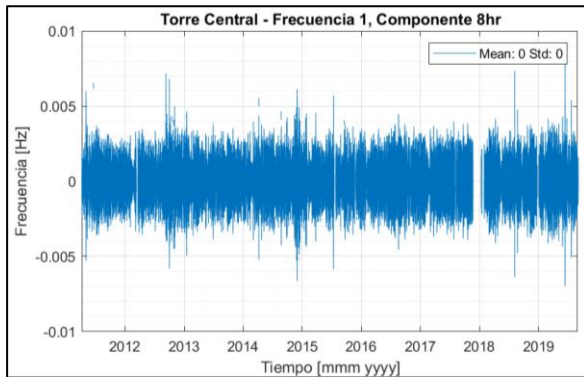


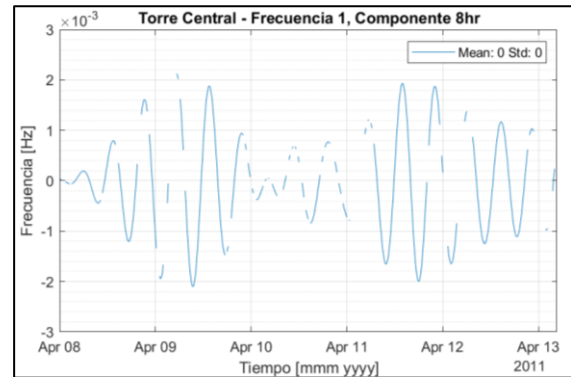
Figura 0.12: Torre Central, humedad absoluta, Comp. 4.8 hrs (zoom diario).



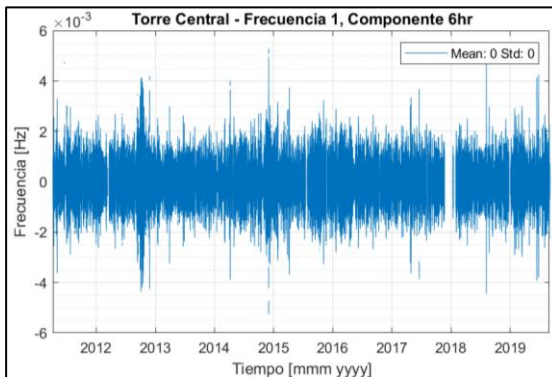
### A.4.3. Torre Central – Componentes frecuencia modal 1



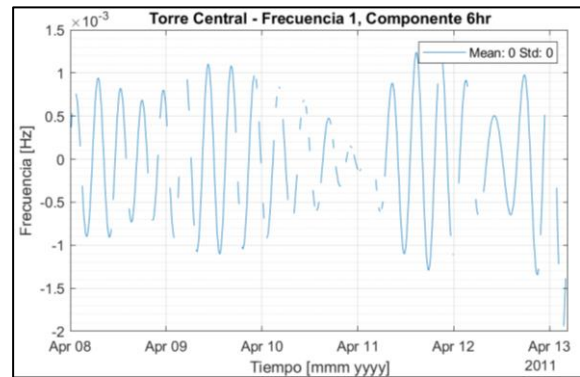
**Figura 0.13: Torre Central, frec. modal 1, Comp. 8 hrs.**



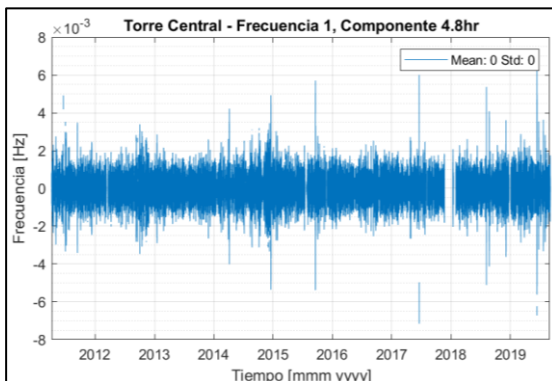
**Figura 0.14: Torre Central, frec. modal 1, Comp. 8 hrs (zoom diario).**



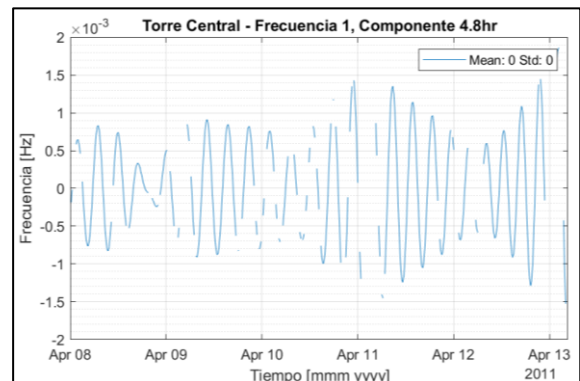
**Figura 0.15: Torre Central, frec. modal 1, Comp. 6 hrs.**



**Figura 0.16: Torre Central, frec. modal 1, Comp. 6 hrs (zoom diario).**



**Figura 0.17: Torre Central, frec. modal 1, Comp. 4.8 hrs.**



**Figura 0.18: Torre Central, frec. modal 1, Comp. 4.8 hrs (zoom diario).**

#### A.4.4. Torre Central – Componentes frecuencia modal 2

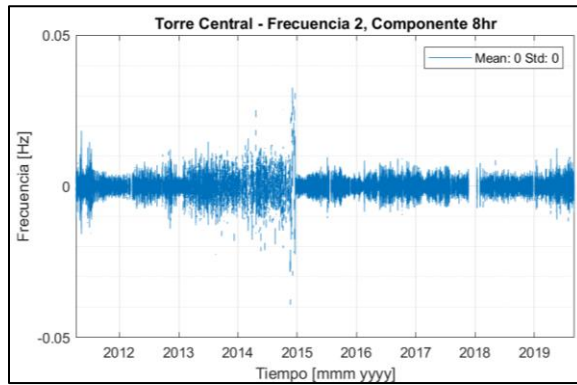


Figura 0.19: Torre Central, frec. modal 2, Comp. 8 hrs.

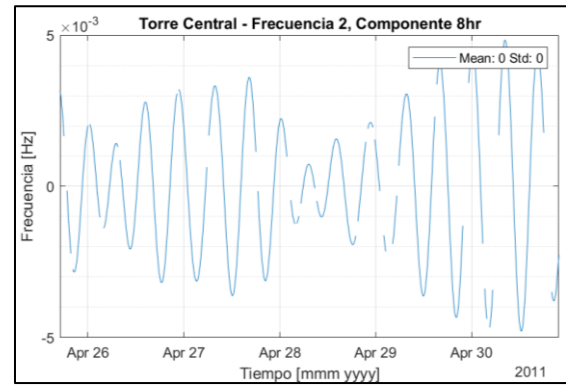


Figura 0.20: Torre Central, frec. modal 2, Comp. 8 hrs (zoom diario).

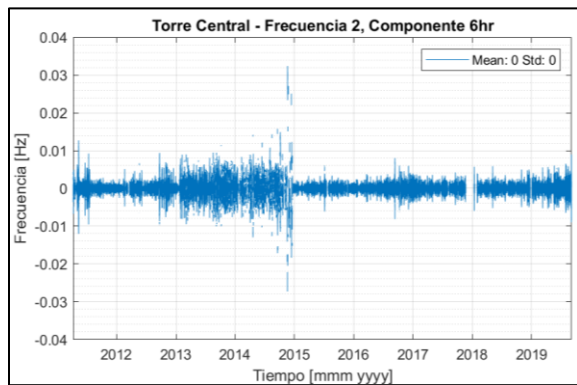


Figura 0.21: Torre Central, frec. modal 2, Comp. 6 hrs.

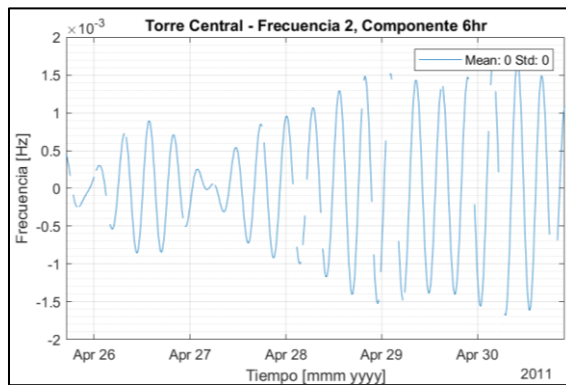


Figura 0.22: Torre Central, frec. modal 2, Comp. 6 hrs (zoom diario).

### A.4.5. Torre Central – Componentes frecuencia modal 3

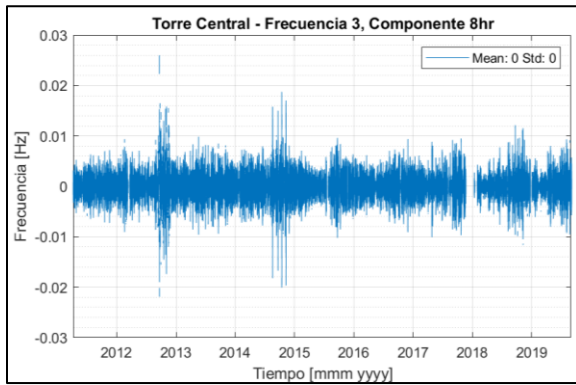


Figura 0.23: Torre Central, frec. modal 3, Comp. 8 hrs.

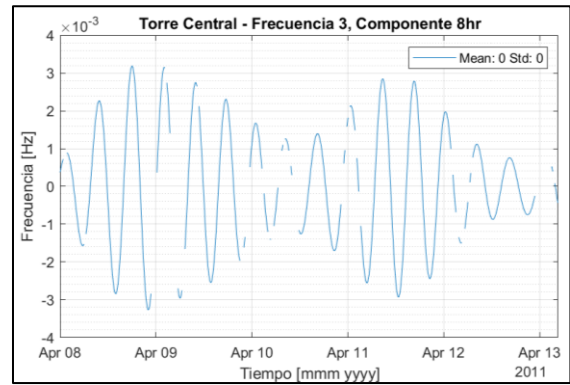


Figura 0.24: Torre Central, frec. modal 3, Comp. 8 hrs (zoom diario).

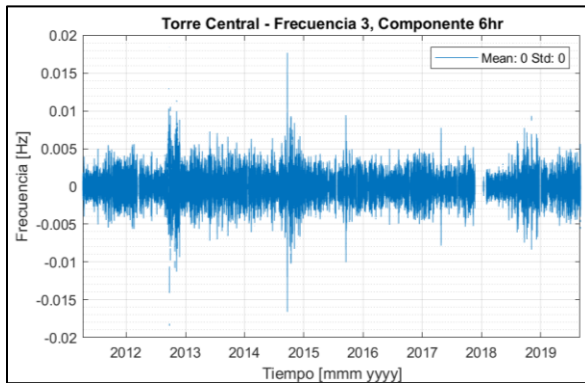


Figura 0.25: Torre Central, frec. modal 3, Comp. 6 hrs.

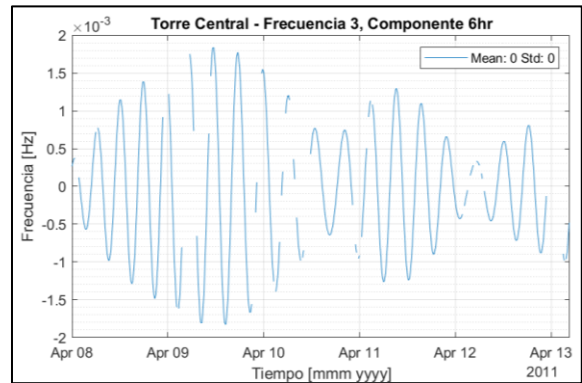


Figura 0.26: Torre Central, frec. modal 3, Comp. 6 hrs (zoom diario).

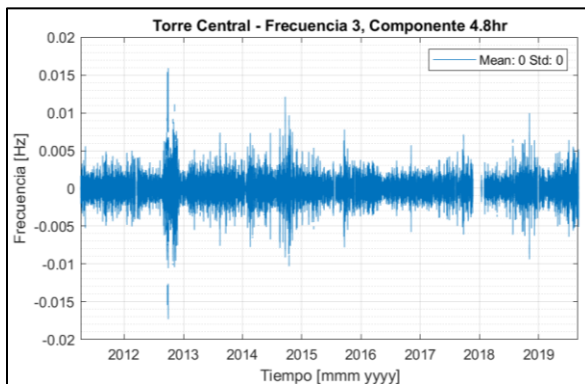


Figura 0.27: Torre Central, frec. modal 3, Comp. 4.8 hrs.

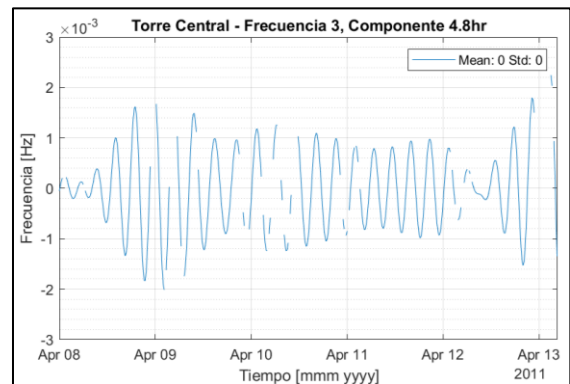
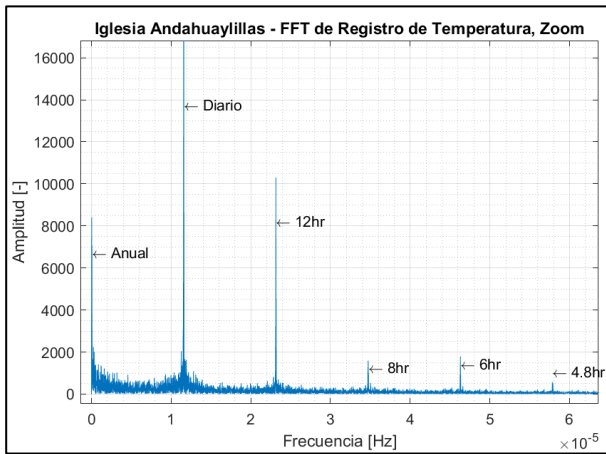
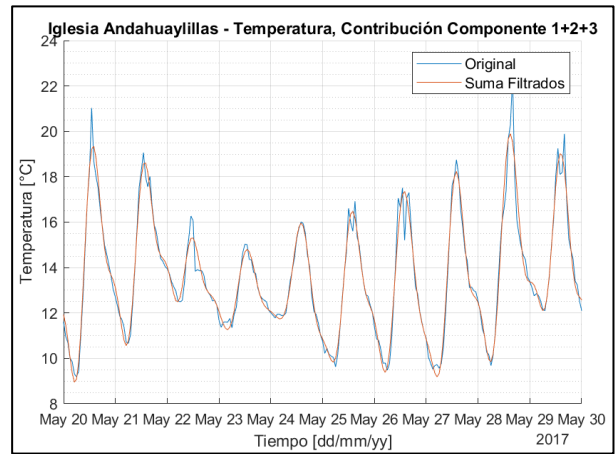


Figura 0.28: Torre Central, frec. modal 3, Comp. 4.8 hrs (zoom diario).

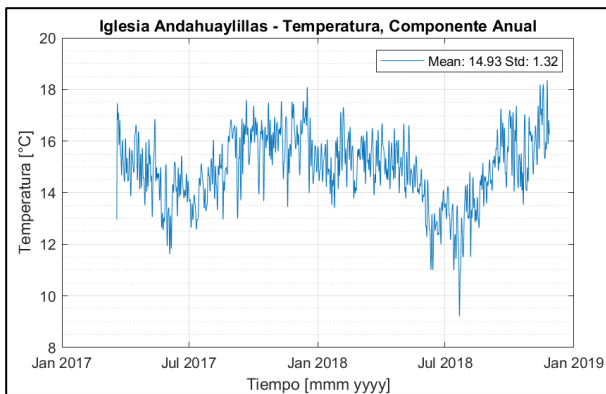
## A.4.6. Iglesia Andahuaylillas – Filtrado Temperatura Ambiental



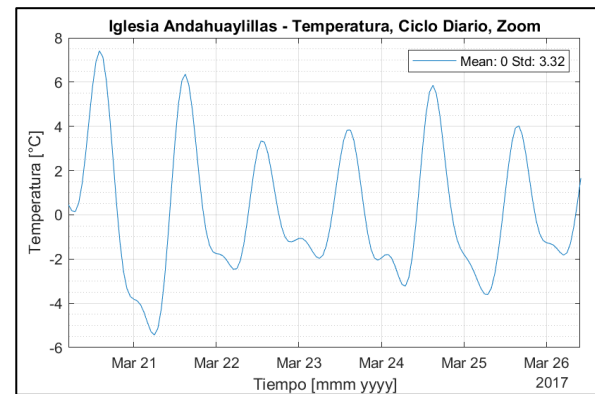
**Figura 0.29: Iglesia Andahuaylillas, temperatura. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.30: Iglesia Andahuaylillas, temperatura. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.31: Iglesia Andahuaylillas, temperatura. Componente estacional.**



**Figura 0.32: Iglesia Andahuaylillas, temperatura. Componente diaria.**

Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron 6 componentes, donde se observa que la componente anual no predomina.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs.

### A.4.7. Iglesia Andahuaylillas – Filtrado Humedad Absoluta

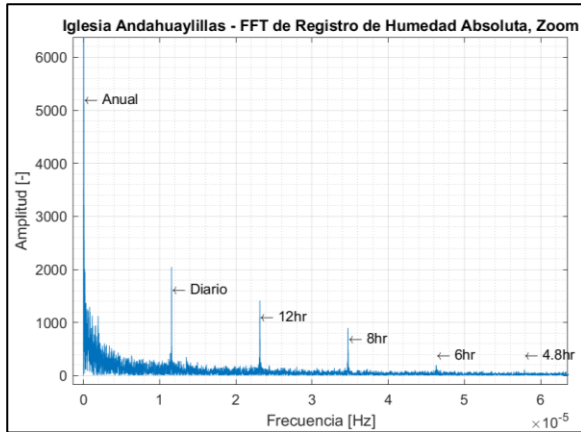


Figura 0.33: Iglesia Andahuaylillas, humedad absoluta. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.

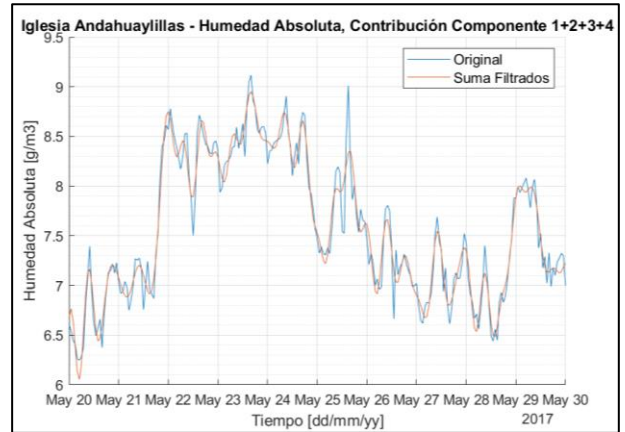


Figura 0.34: Iglesia Andahuaylillas, humedad absoluta. Señal filtrada reconstruida vs señal original.

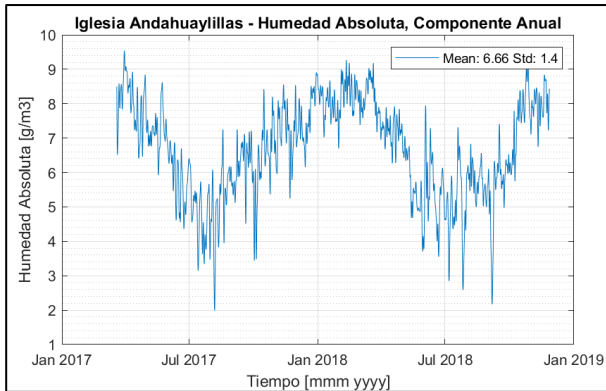


Figura 0.35: Iglesia Andahuaylillas, humedad absoluta. Componente estacional.

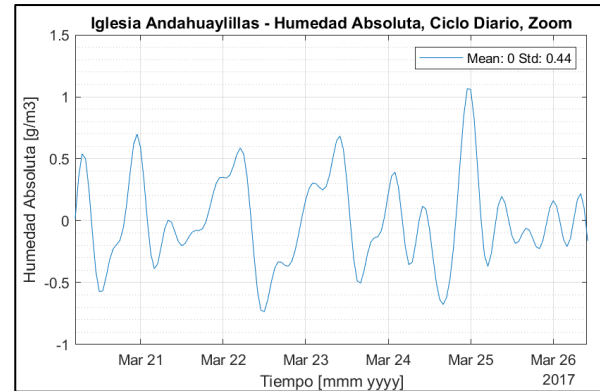


Figura 0.36: Iglesia Andahuaylillas, humedad absoluta. Componente diaria.

Detalles del proceso de filtrado:

- a) Se identificaron 5 componentes, filtrándose cada una de estas.
- b) Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.

### A.4.8. Iglesia Andahuaylillas – Filtrado Frecuencia Modal 1

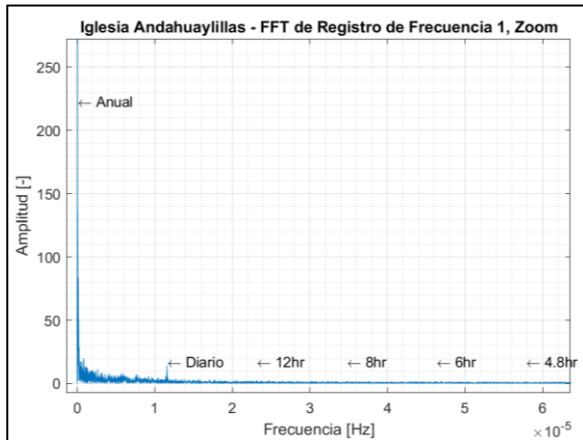


Figura 0.37: Iglesia Andahuaylillas, frecuencia modal 1. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.

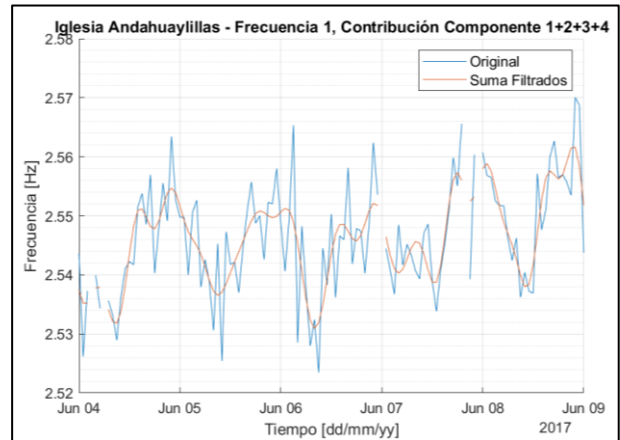


Figura 0.38: Iglesia Andahuaylillas, frecuencia modal 1. Señal filtrada reconstruida vs señal original.

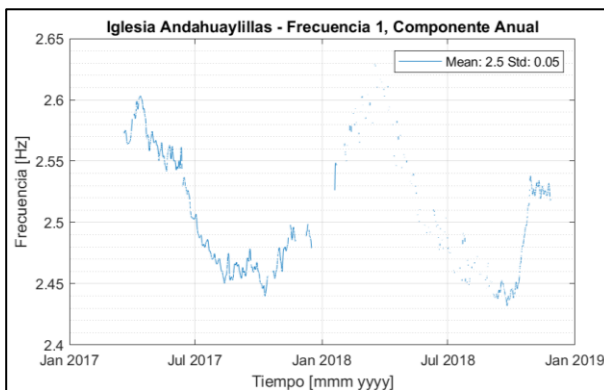


Figura 0.39: Iglesia Andahuaylillas, frecuencia modal 1. Componente estacional.

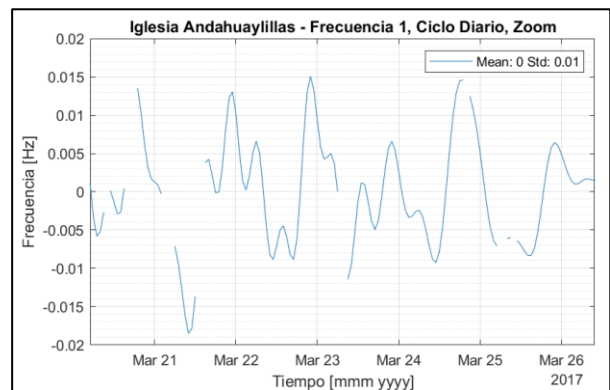


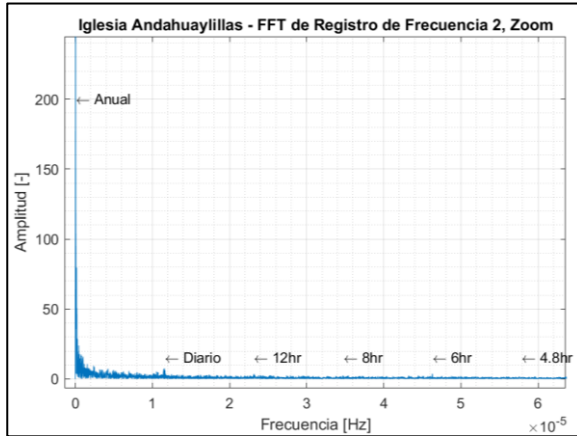
Figura 0.40: Iglesia Andahuaylillas, frecuencia modal 1. Componente diaria.

Detalles del proceso de filtrado:

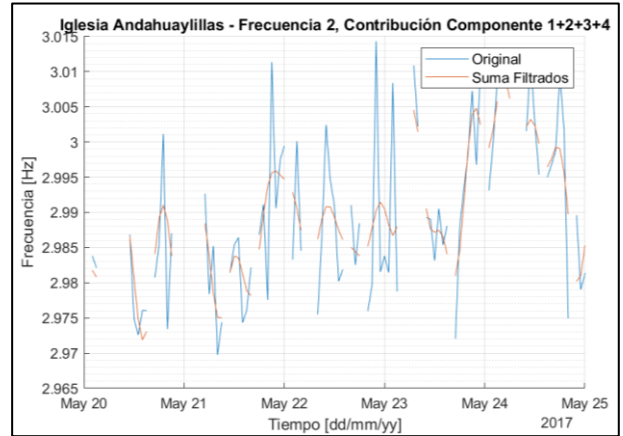
- Se identificaron y filtraron 2 componentes. Además, se filtró la vecindad correspondiente de las componentes 3 y 4, incluso no estando presentes en la transformada de Fourier.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.



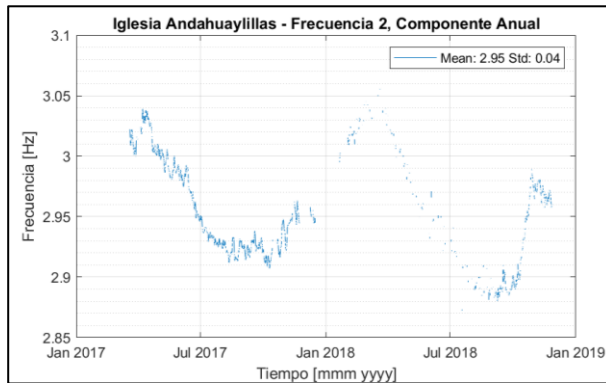
## A.4.9. Iglesia Andahuaylillas – Filtrado Frecuencia Modal 2



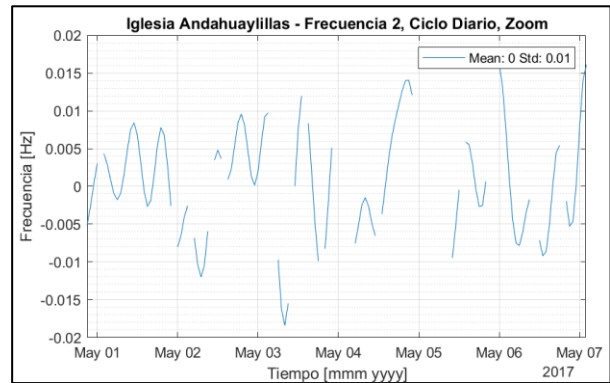
**Figura 0.41: Iglesia Andahuaylillas, frecuencia modal 2. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.42: Iglesia Andahuaylillas, frecuencia modal 2. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.43: Iglesia Andahuaylillas, frecuencia modal 2. Componente estacional.**



**Figura 0.44: Iglesia Andahuaylillas, frecuencia modal 2. Componente diaria.**

Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron y filtraron 2 componentes. Además, se filtró la vecindad correspondiente de las componentes 3 y 4, incluso no estando presentes en la transformada de Fourier.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.

### A.4.10. Iglesia Andahuaylillas – Filtrado Frecuencia Modal 3

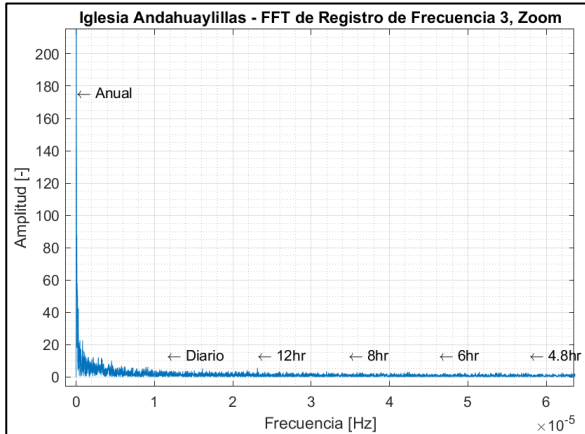


Figura 0.45: Iglesia Andahuaylillas, frecuencia modal 3. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.

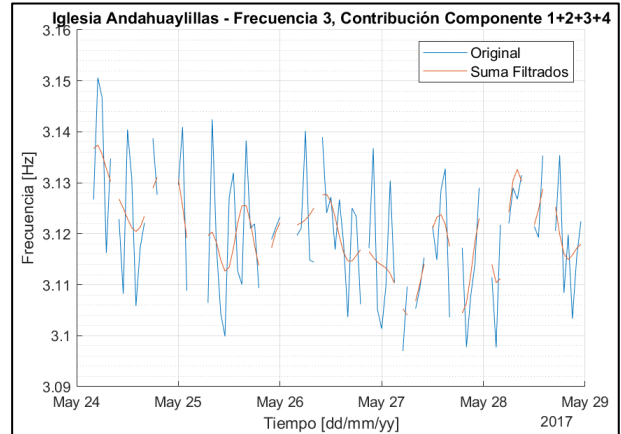


Figura 0.46: Iglesia Andahuaylillas, frecuencia modal 3. Señal filtrada reconstruida vs señal original.

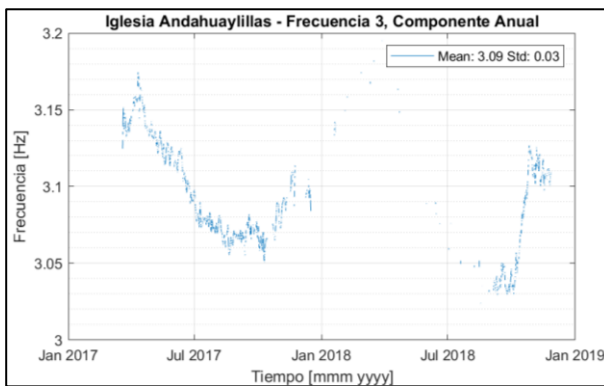


Figura 0.47: Iglesia Andahuaylillas, frecuencia modal 3. Componente estacional.

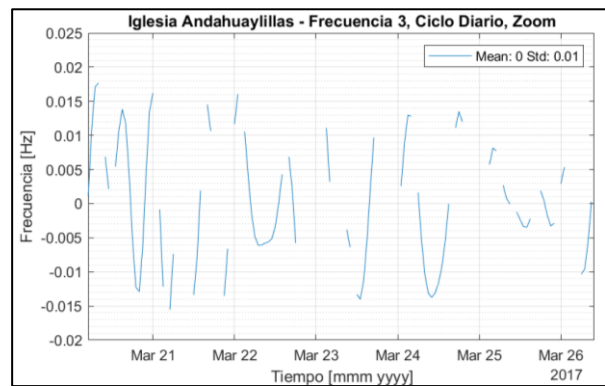


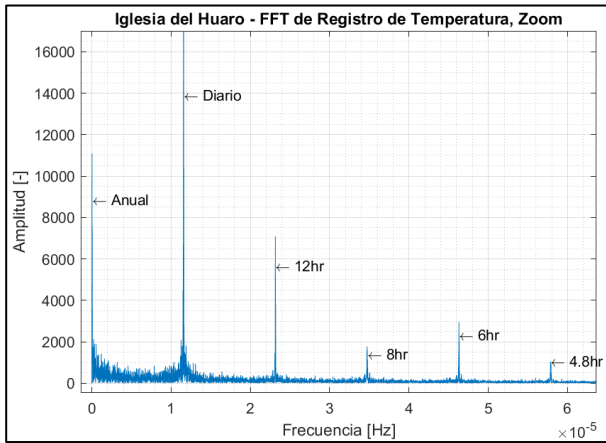
Figura 0.48: Iglesia Andahuaylillas, frecuencia modal 3. Componente diaria.

Detalles del proceso de filtrado:

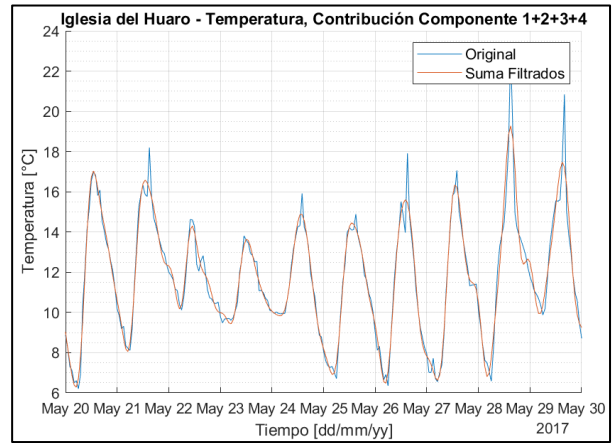
- Se identificaron y filtraron 2 componentes (componentes 1 y 3). Además, se filtró la vecindad correspondiente de las componentes 2 y 4, incluso no estando presentes en la transformada de Fourier.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.



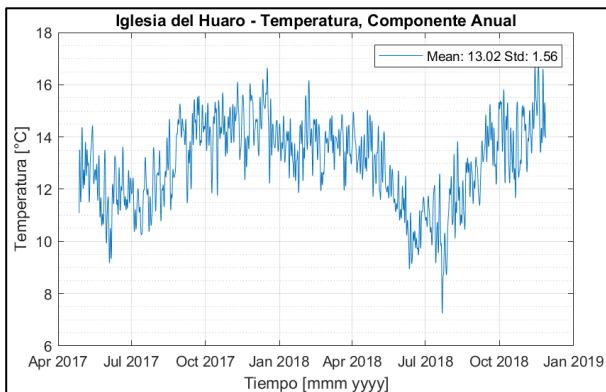
## A.4.11. Iglesia de Huaru – Filtrado Temperatura Ambiental



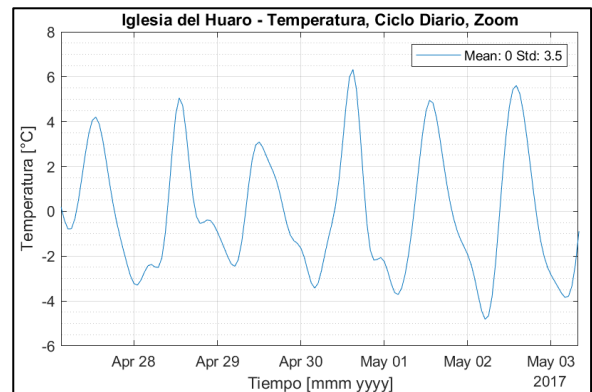
**Figura 0.49: Iglesia de Huaru, temperatura. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.50: Iglesia de Huaru, temperatura. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.51: Iglesia de Huaru, temperatura. Componente estacional.**

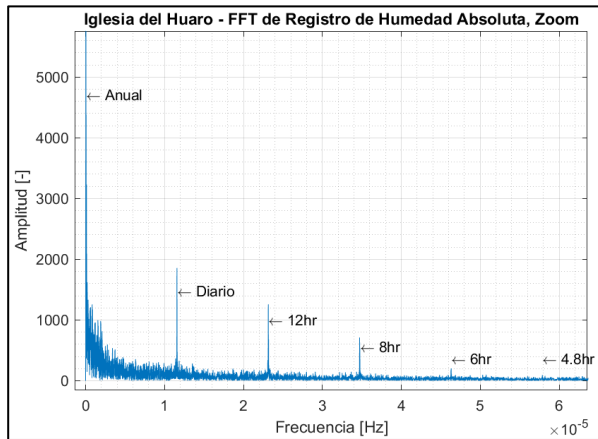


**Figura 0.52: Iglesia de Huaru, temperatura. Componente diaria.**

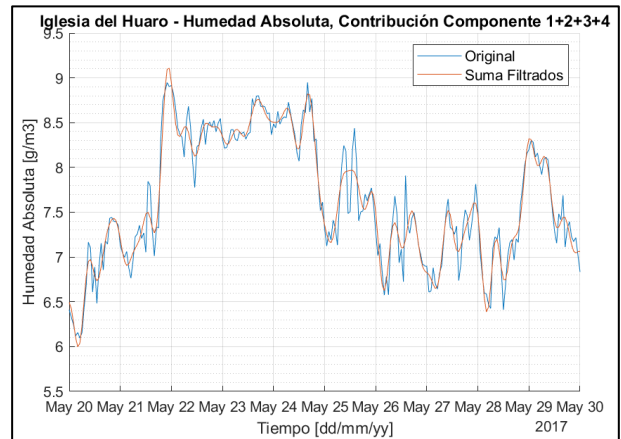
Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron 6 componentes, donde se observa que la componente anual no predomina.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.

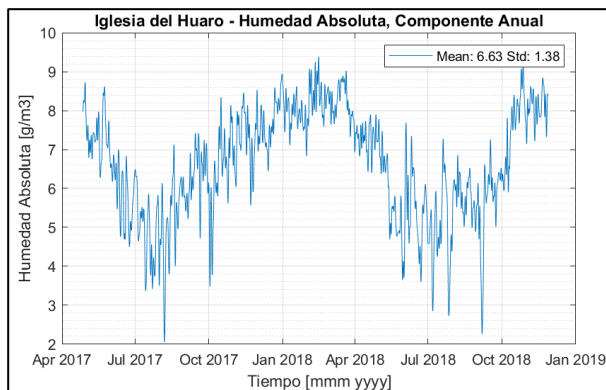
## A.4.12. Iglesia de Huaro – Filtrado Humedad Absoluta



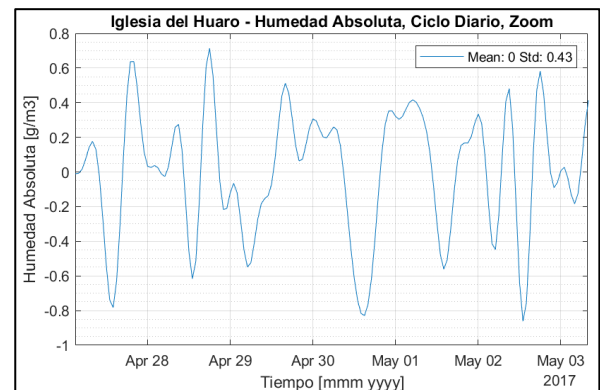
**Figura 0.53: Iglesia de Huaro, humedad absoluta. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.54: Iglesia de Huaro, humedad absoluta. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.55: Iglesia de Huaro, humedad absoluta. Componente estacional.**

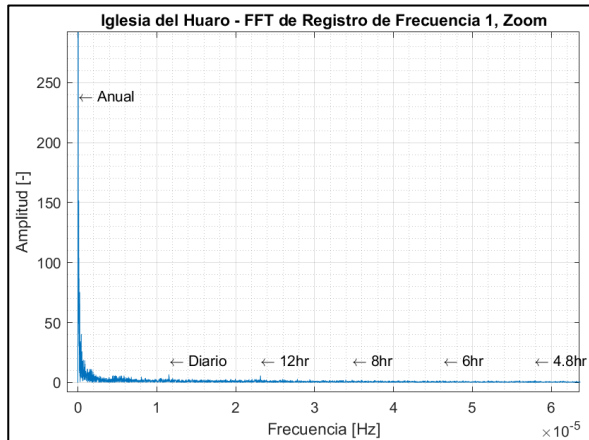


**Figura 0.56: Iglesia de Huaro, humedad absoluta. Componente diaria.**

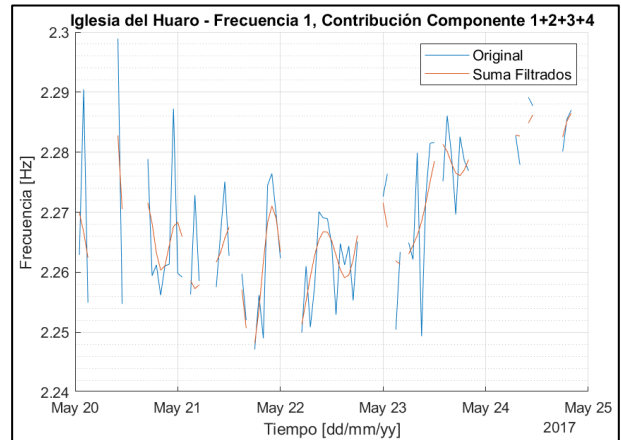
Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron 5 componentes.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.

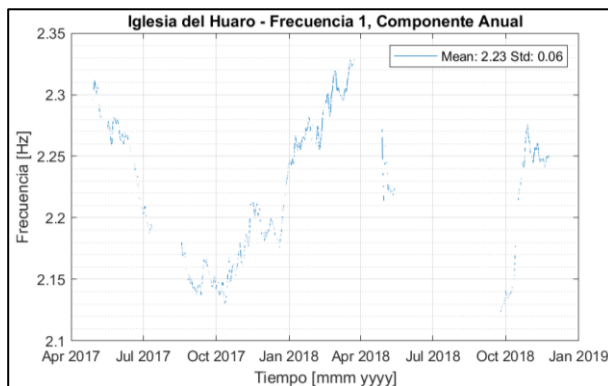
### A.4.13. Iglesia de Huaro – Filtrado Frecuencia Modal 1



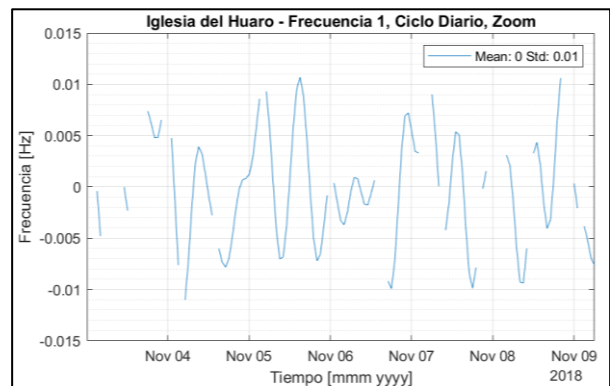
**Figura 0.57: Iglesia de Huaro, frecuencia modal 1. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.58: Iglesia de Huaro, frecuencia modal 1. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.59: Iglesia de Huaro, frecuencia modal 1. Componente estacional.**

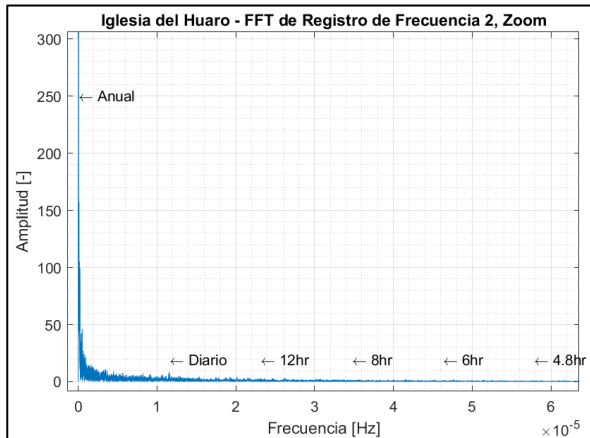


**Figura 0.60: Iglesia de Huaro, frecuencia modal 1. Componente diaria.**

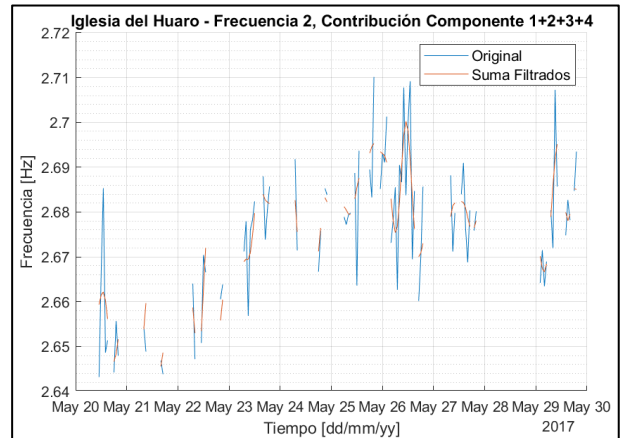
Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron y filtraron 2 componentes. Además, se filtró la vecindad correspondiente de las componentes 3 y 4, incluso no estando presentes en la transformada de Fourier.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.

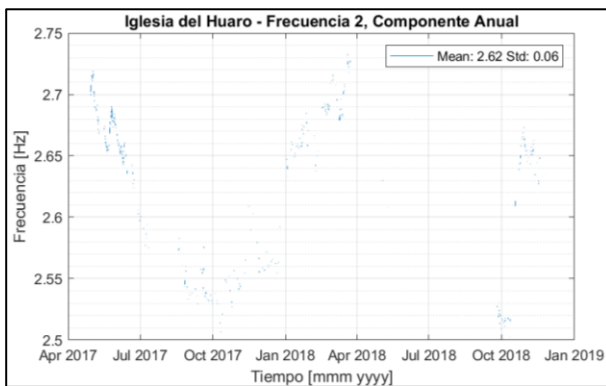
## A.4.14. Iglesia de Huaru – Filtrado Frecuencia Modal 2



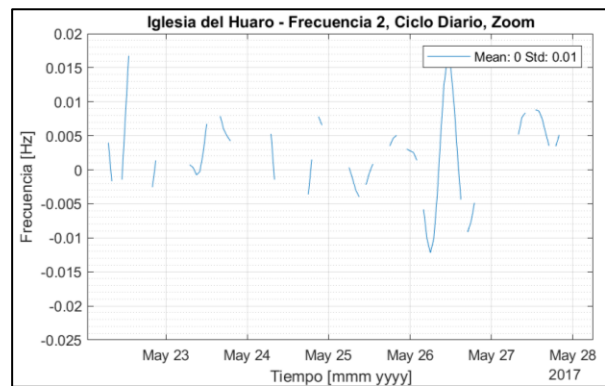
**Figura 0.61: Iglesia de Huaru, frecuencia modal 2. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.62: Iglesia de Huaru, frecuencia modal 2. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.63: Iglesia de Huaru, frecuencia modal 2. Componente estacional.**

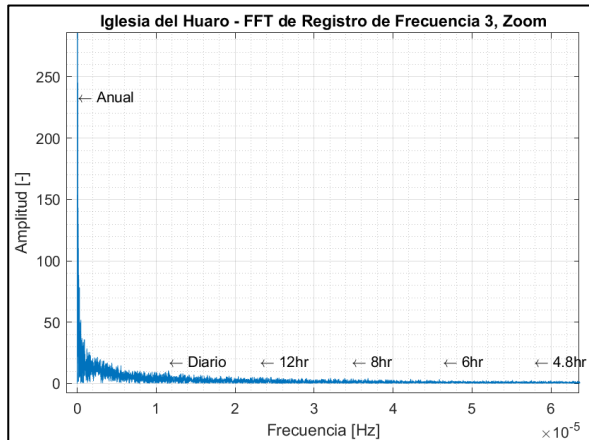


**Figura 0.64: Iglesia de Huaru, frecuencia modal 2. Componente diaria.**

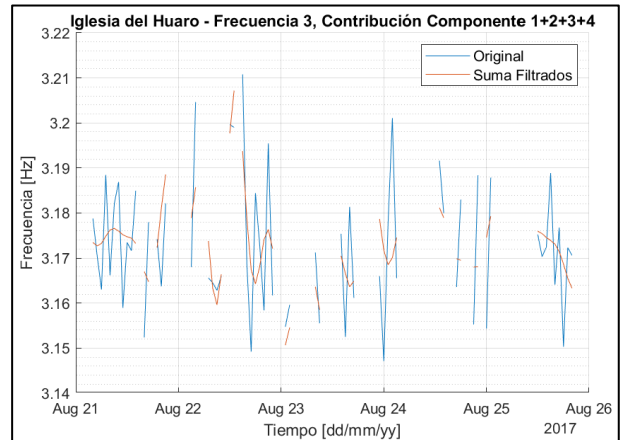
Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron y filtraron 2 componentes. Además, se filtró la vecindad correspondiente de las componentes 3 y 4, incluso no estando presentes en la transformada de Fourier.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.
- En la componente estacional se ve el porcentaje de vacíos en la frecuencia 2.

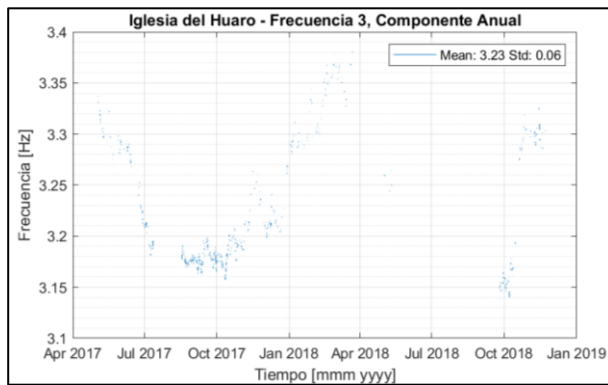
### A.4.15. Iglesia de Huaro – Filtrado Frecuencia Modal 3



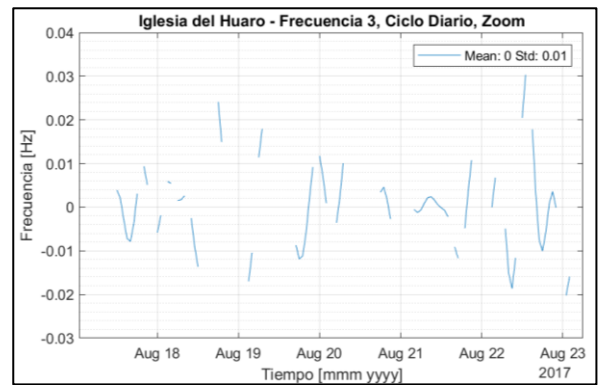
**Figura 0.65: Iglesia de Huaro, frecuencia modal 3. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.66: Iglesia de Huaro, frecuencia modal 3. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.67: Iglesia de Huaro, frecuencia modal 3. Componente estacional.**

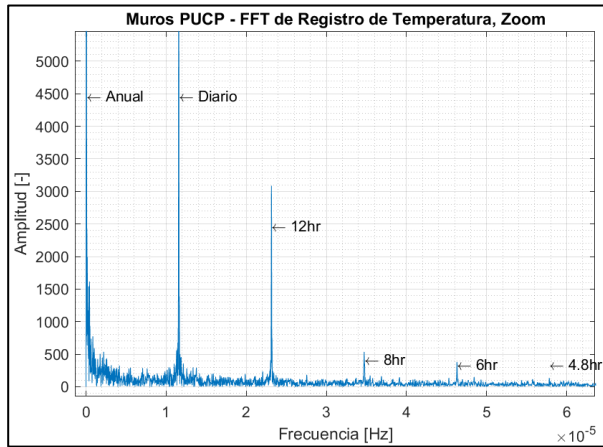


**Figura 0.68: Iglesia de Huaro, frecuencia modal 3. Componente diaria.**

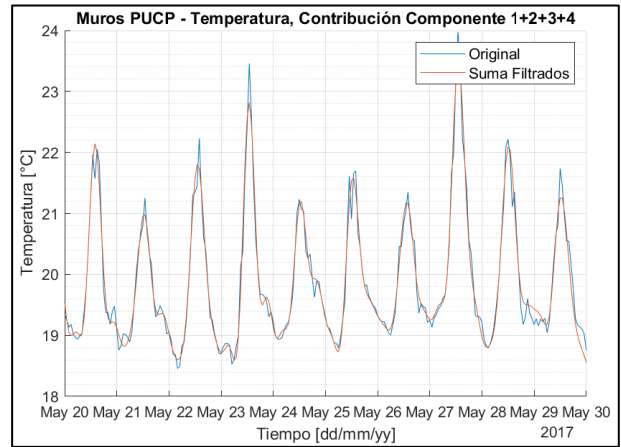
Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificó solo la primera componente. Además, se filtró la vecindad correspondiente de las componentes 2, 3 y 4, incluso no estando presentes en la transformada de Fourier.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.

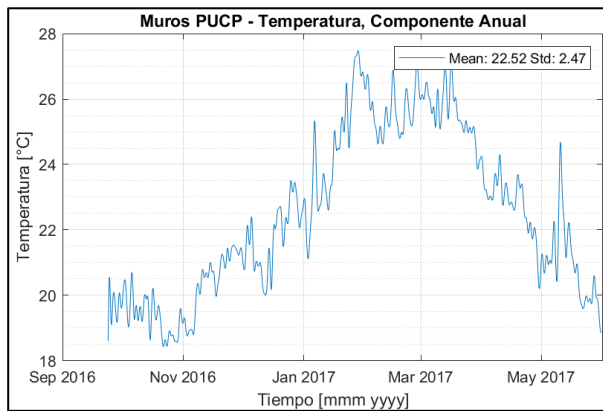
## A.4.16. Muro Tipo I, II y III – Filtrado Temperatura Ambiental



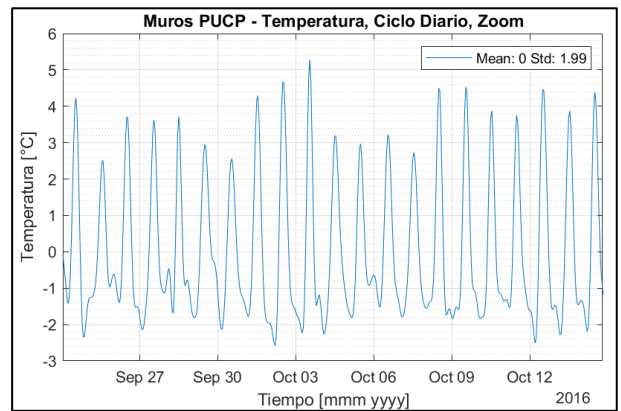
**Figura 0.69: Muros PUCP, temperatura. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.70: Muros PUCP, temperatura. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.71: Muros PUCP, temperatura. Componente estacional.**

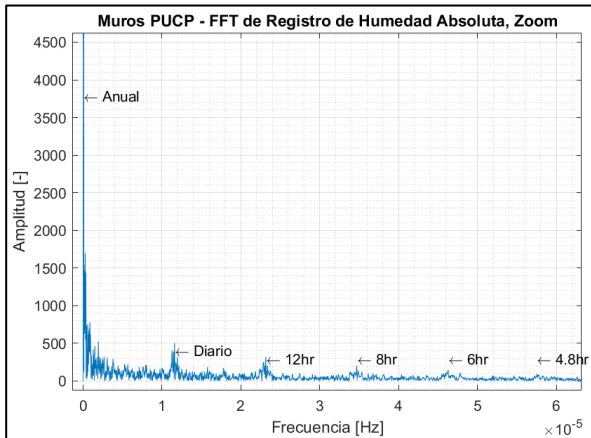


**Figura 0.72: Muros PUCP, temperatura. Componente diaria.**

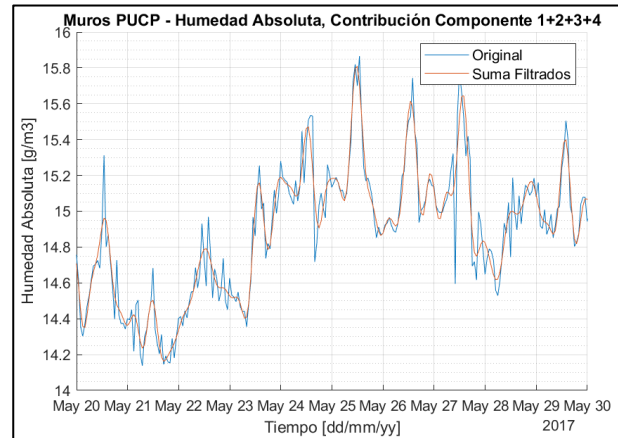
Detalles del proceso de filtrado:

- a) Se identificaron 6 componentes.
- b) Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.

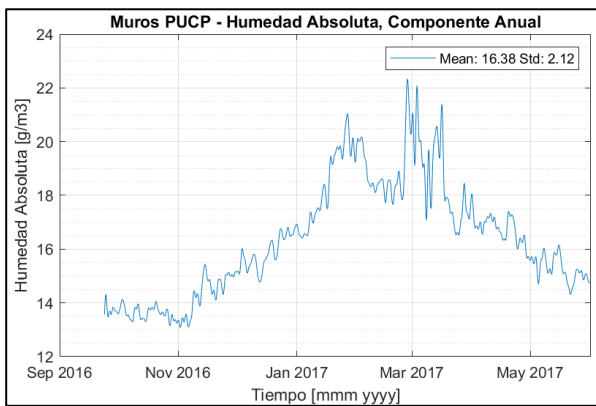
## A.4.17. Muro Tipo I, II y III – Filtrado Humedad Absoluta



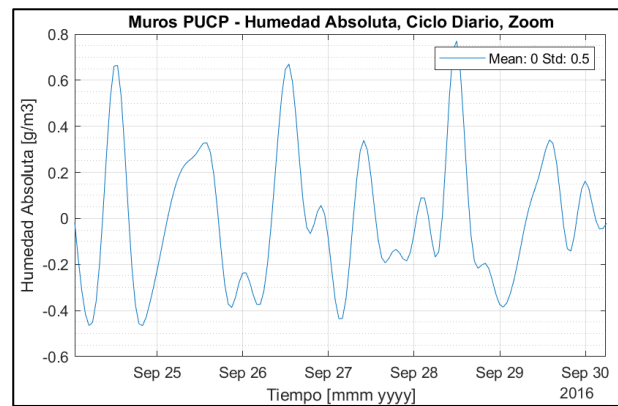
**Figura 0.73: Muros PUCP, humedad absoluta. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.74: Muros PUCP, humedad absoluta. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.75: Muros PUCP, humedad absoluta. Componente estacional.**

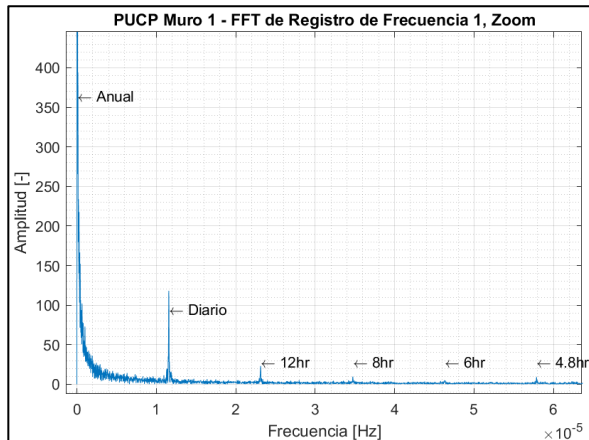


**Figura 0.76: Muros PUCP, humedad absoluta. Componente diaria.**

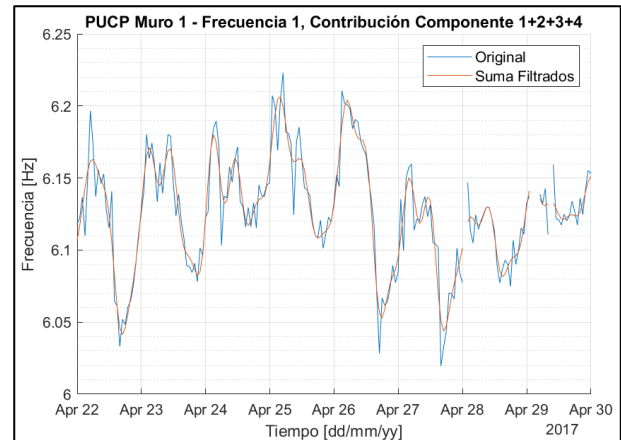
Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron 6 componentes, filtrándose cada una de estas.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.
- Se observa el rango de alta variación de los datos (marzo a abril del 2017) en la componente estacional.

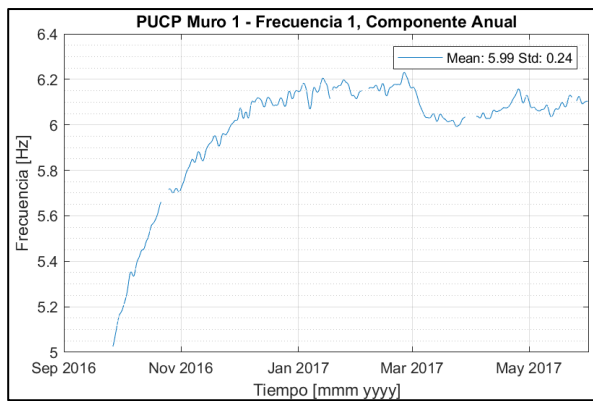
## A.4.18. Muro Tipo I – Filtrado Frecuencia Modal 1



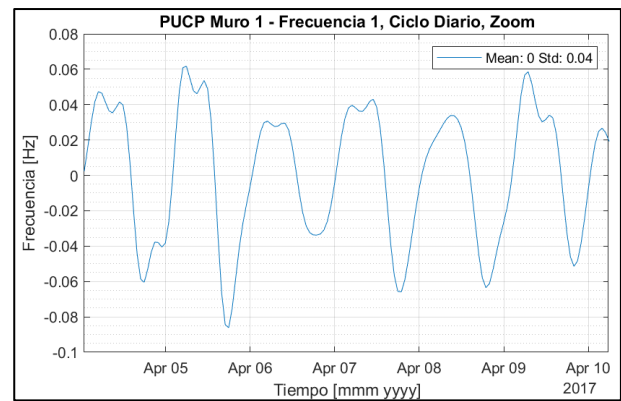
**Figura 0.77: Muro Tipo I, frecuencia modal 1. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.78: Muro Tipo I, frecuencia modal 1. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.79: Muro Tipo I, frecuencia modal 1. Componente estacional.**



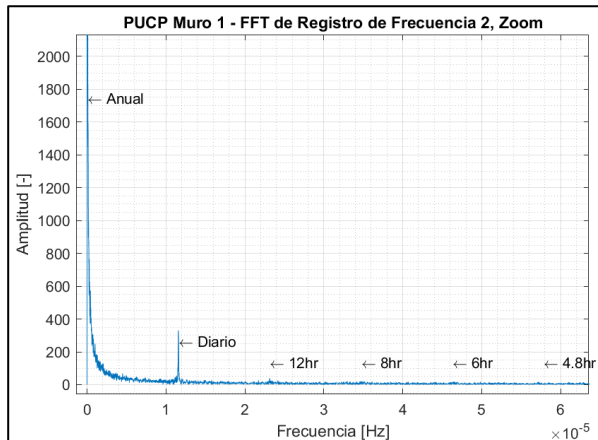
**Figura 0.80: Muro Tipo I, frecuencia modal 1. Componente diaria.**

Detalles del proceso de filtrado:

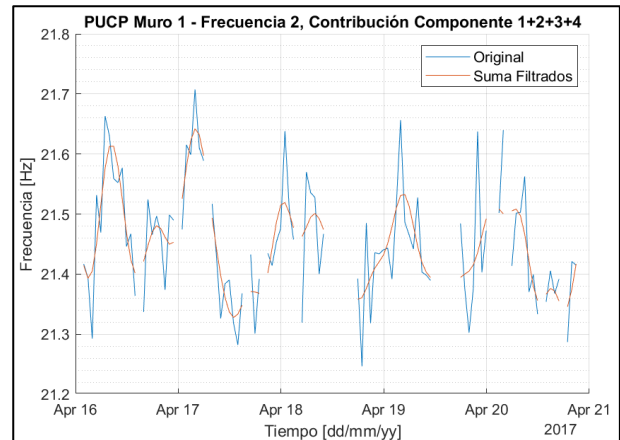
- Se identificaron 6 componentes, filtrándose cada una de estas.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.
- Se observa el efecto del endurecimiento del muro en la componente estacional.



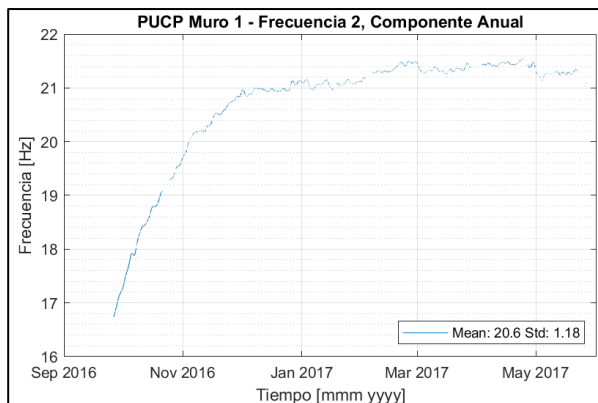
## A.4.19. Muro Tipo I – Filtrado Frecuencia Modal 2



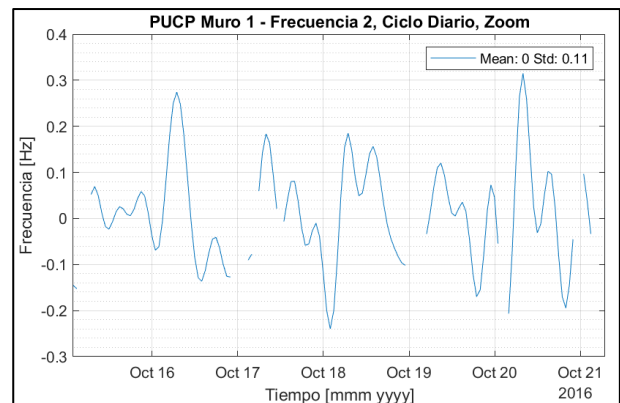
**Figura 0.81: Muro Tipo I, frecuencia modal 2. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.82: Muro Tipo I, frecuencia modal 2. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.83: Muro Tipo I, frecuencia modal 2. Componente estacional.**

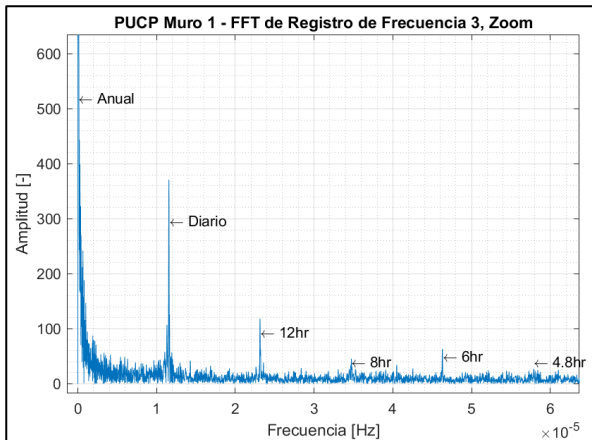


**Figura 0.84: Muro Tipo I, frecuencia modal 2. Componente diaria.**

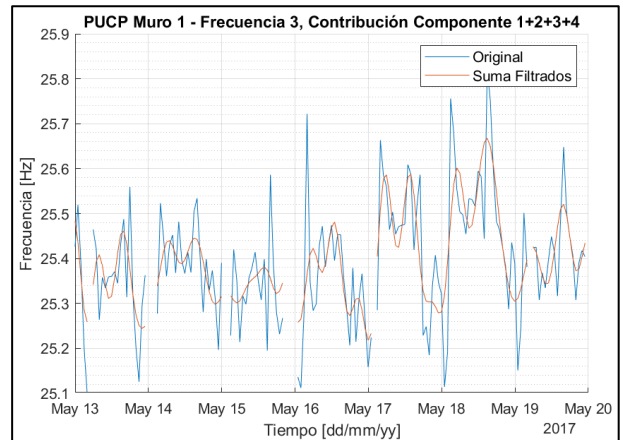
Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron y filtraron 3 componentes. Además, se filtró la vecindad correspondiente de la componente 4, incluso no estando presente en la transformada de Fourier.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.
- Se observa el efecto del endurecimiento del muro en la componente estacional.

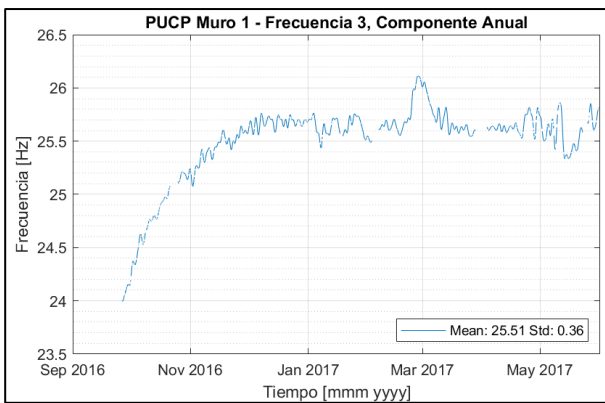
## A.4.20. Muro Tipo I – Filtrado Frecuencia Modal 3



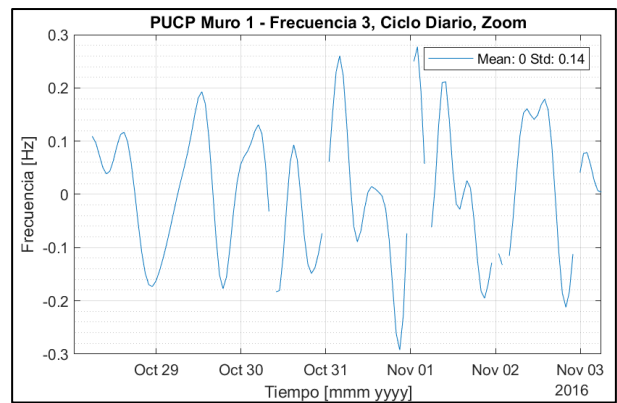
**Figura 0.85: Muro Tipo I, frecuencia modal 3. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.86: Muro Tipo I, frecuencia modal 3. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.87: Muro Tipo I, frecuencia modal 3. Componente estacional.**

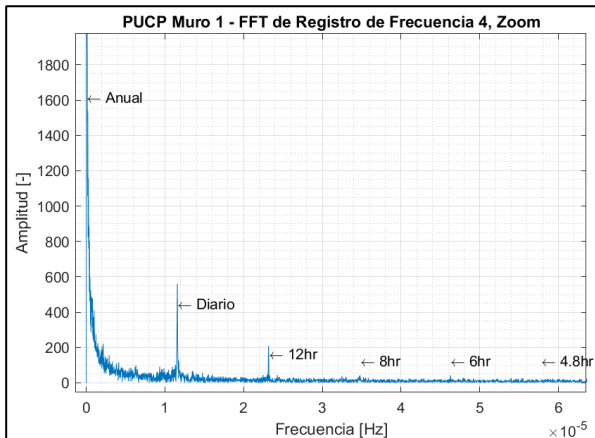


**Figura 0.88: Muro Tipo I, frecuencia modal 3. Componente diaria.**

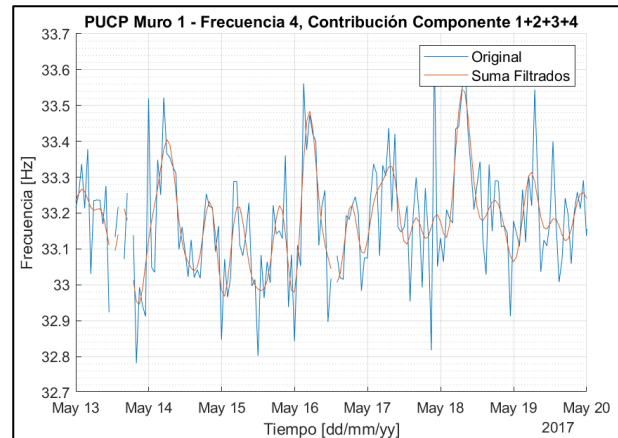
Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron y filtraron 5 componentes.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.
- Se observa el efecto del endurecimiento del muro en la componente estacional.

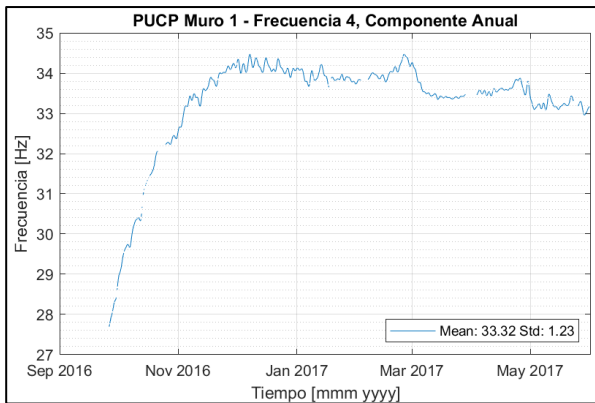
## A.4.21. Muro Tipo I – Filtrado Frecuencia Modal 4



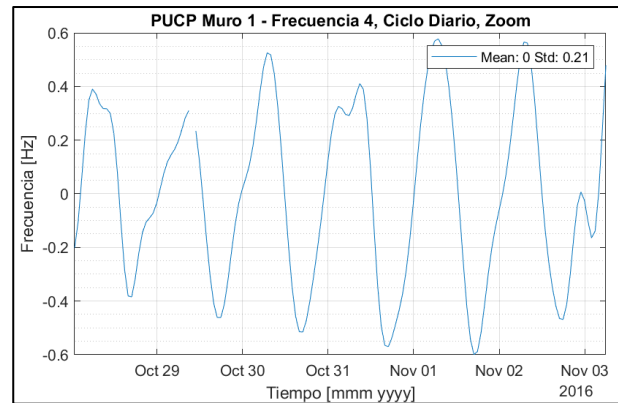
**Figura 0.89: Muro Tipo I, frecuencia modal 4. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.90: Muro Tipo I, frecuencia modal 4. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.91: Muro Tipo I, frecuencia modal 4. Componente estacional.**

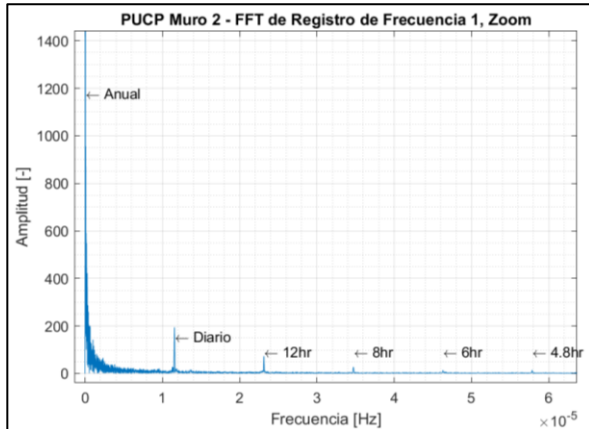


**Figura 0.92: Muro Tipo I, frecuencia modal 4. Componente diaria.**

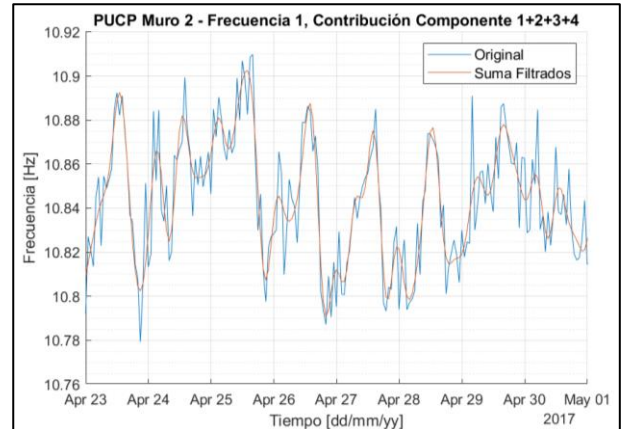
Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron y filtraron 5 componentes.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.
- Se observa el efecto del endurecimiento del muro en la componente estacional.

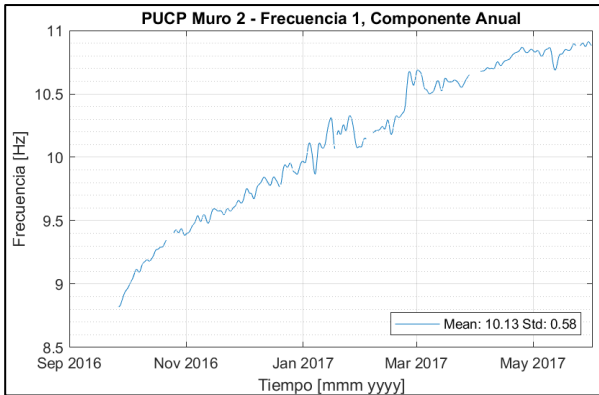
## A.4.22. Muro Tipo II – Filtrado Frecuencia Modal 1



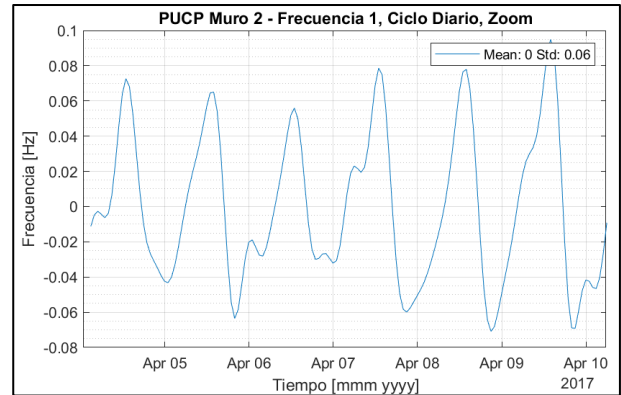
**Figura 0.93: Muro Tipo II, frecuencia modal 1. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.94: Muro Tipo II, frecuencia modal 1. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.95: Muro Tipo II, frecuencia modal 1. Componente estacional.**

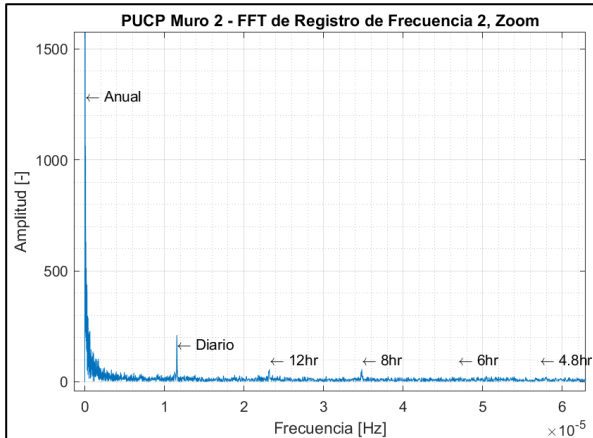


**Figura 0.96: Muro Tipo II, frecuencia modal 1. Componente diaria.**

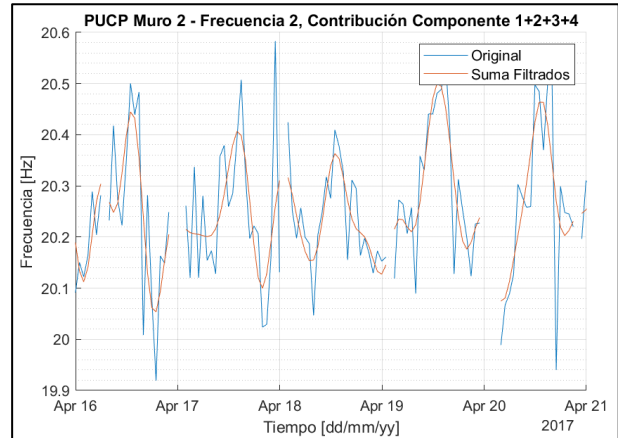
Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron y filtraron 6 componentes.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.
- Se observa el efecto del endurecimiento del muro en la componente estacional.

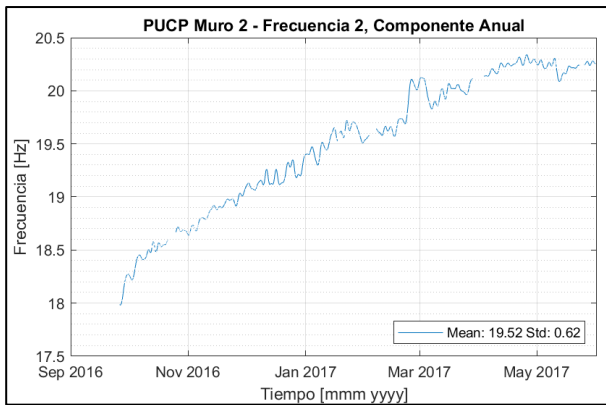
## A.4.23. Muro Tipo II – Filtrado Frecuencia Modal 2



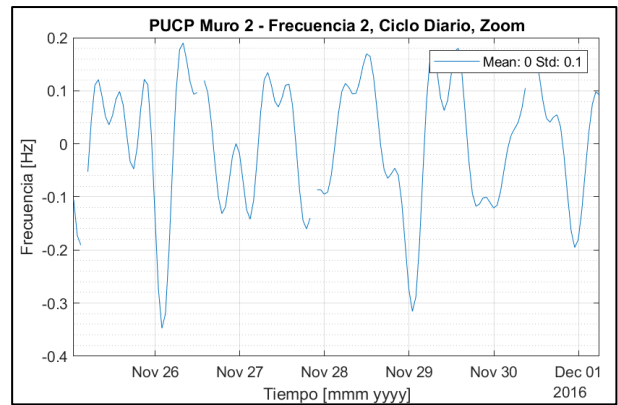
**Figura 0.97: Muro Tipo II, frecuencia modal 2. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.98: Muro Tipo II, frecuencia modal 2. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.99: Muro Tipo II, frecuencia modal 2. Componente estacional.**

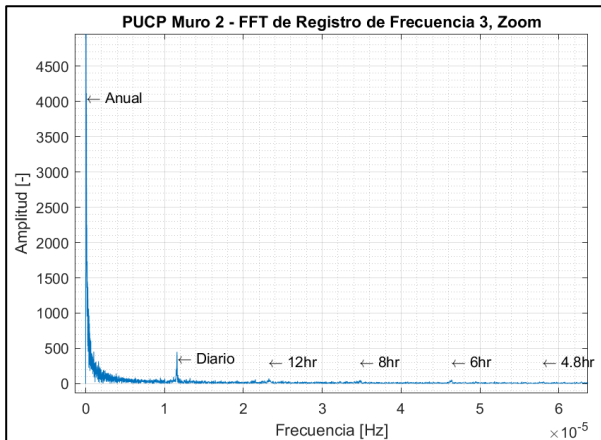


**Figura 0.100: Muro Tipo II, frecuencia modal 2. Componente diaria.**

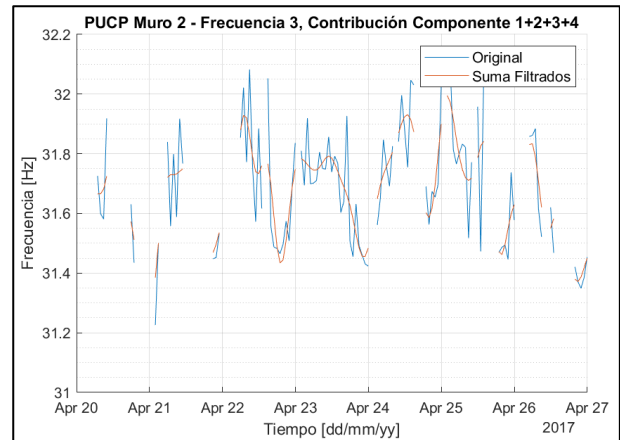
Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron y filtraron 4 componentes.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.
- Se observa el efecto del endurecimiento del muro en la componente estacional.

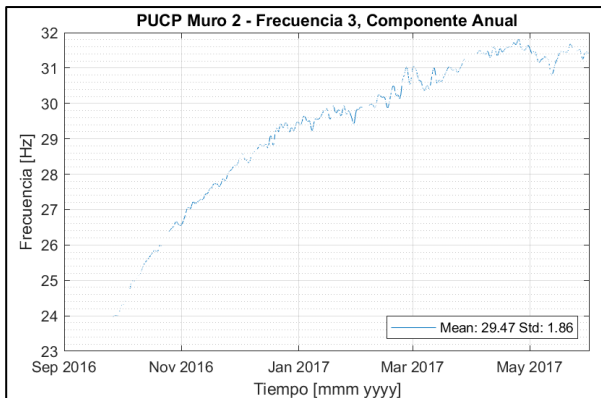
### A.4.24. Muro Tipo II – Filtrado Frecuencia Modal 3



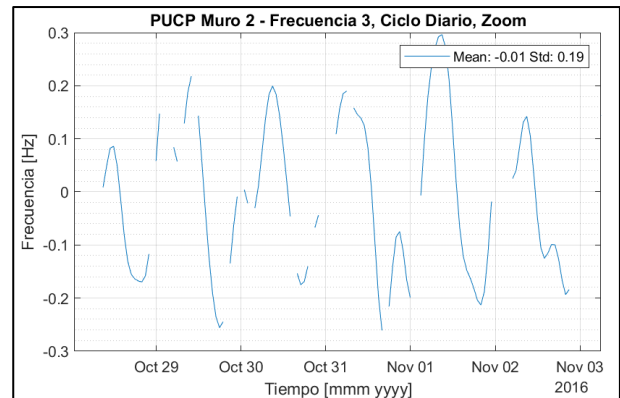
**Figura 0.101: Muro Tipo II, frecuencia modal 3. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.102: Muro Tipo II, frecuencia modal 3. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.103: Muro Tipo II, frecuencia modal 3. Componente estacional.**



**Figura 0.104: Muro Tipo II, frecuencia modal 3. Componente diaria.**

Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron y filtraron 5 componentes.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.
- Se observa el efecto del endurecimiento del muro en la componente estacional.

## A.4.25. Muro Tipo III – Filtrado Frecuencia Modal 1

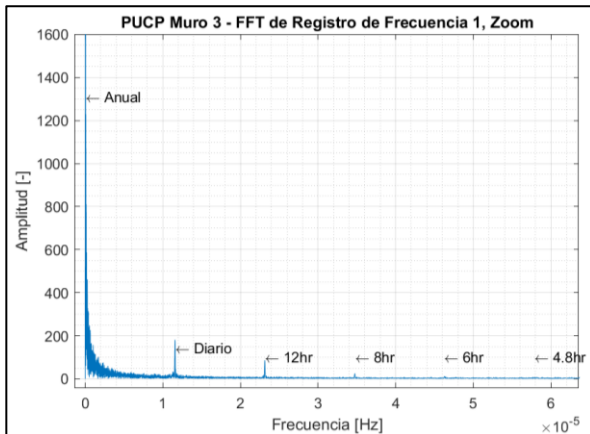


Figura 0.105: Muro Tipo III, frecuencia modal 1. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.

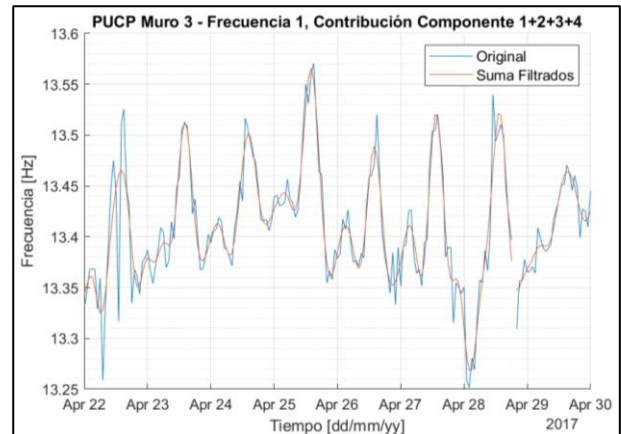


Figura 0.106: Muro Tipo III, frecuencia modal 1. Señal filtrada reconstruida vs señal original.

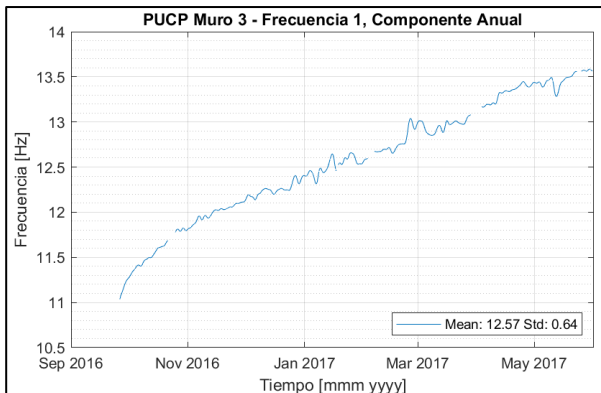


Figura 0.107: Muro Tipo III, frecuencia modal 1. Componente estacional.

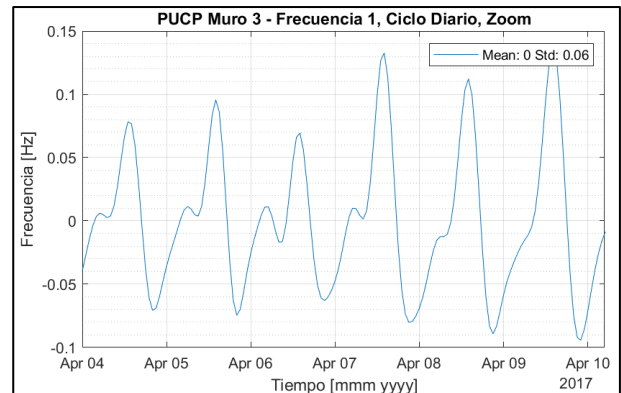
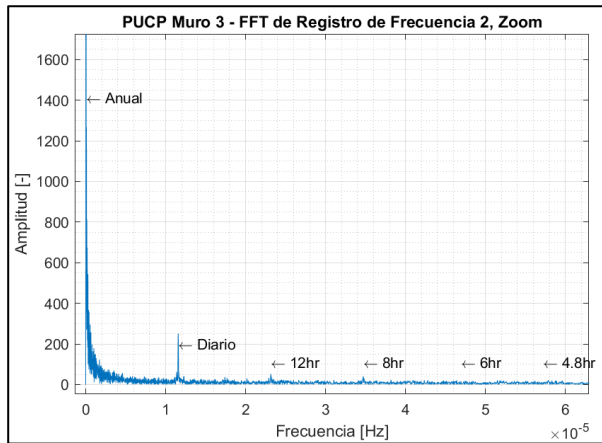


Figura 0.108: Muro Tipo III, frecuencia modal 1. Componente diaria.

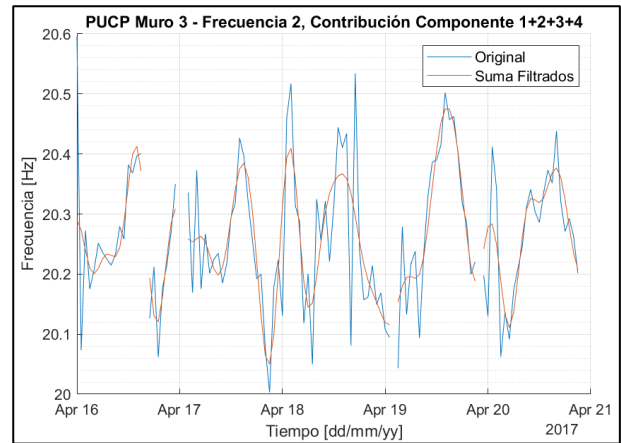
Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron y filtraron 4 componentes.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.
- Se observa el efecto del endurecimiento del muro en la componente estacional.

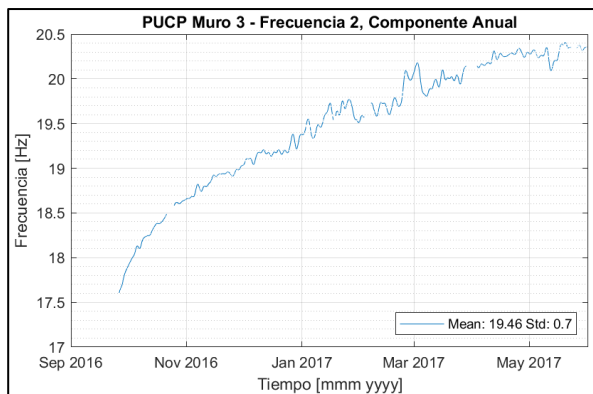
## A.4.26. Muro Tipo III – Filtrado Frecuencia Modal 2



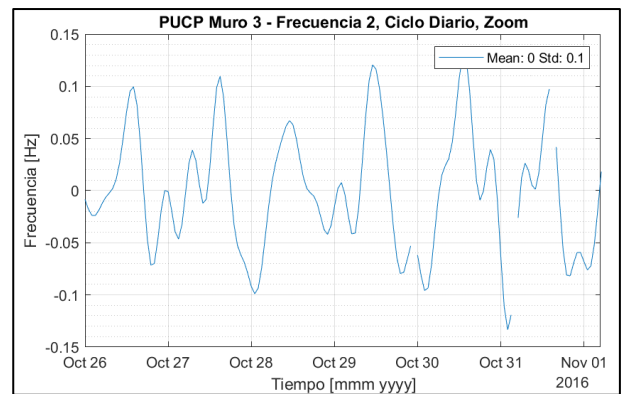
**Figura 0.109: Muro Tipo III, frecuencia modal 2. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.110: Muro Tipo III, frecuencia modal 2. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.111: Muro Tipo III, frecuencia modal 2. Componente estacional.**



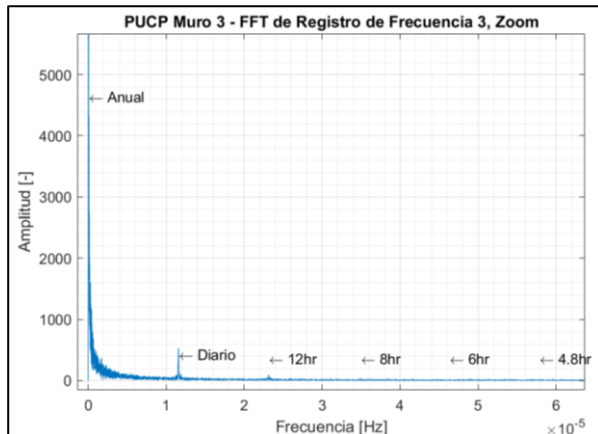
**Figura 0.112: Muro Tipo III, frecuencia modal 2. Componente diaria.**

Detalles del proceso de filtrado:

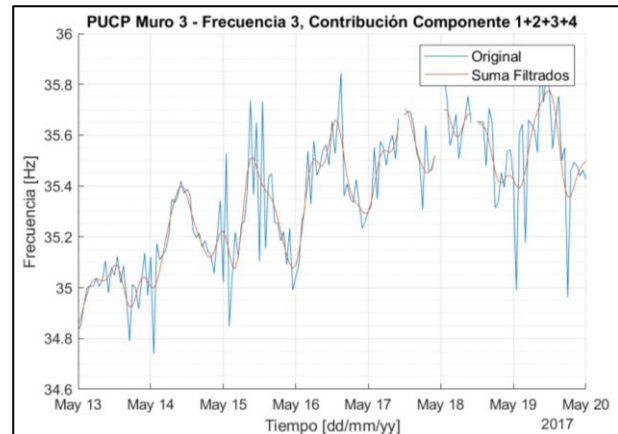
- Se identificaron y filtraron 4 componentes.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.
- Se observa el efecto del endurecimiento del muro en la componente estacional.



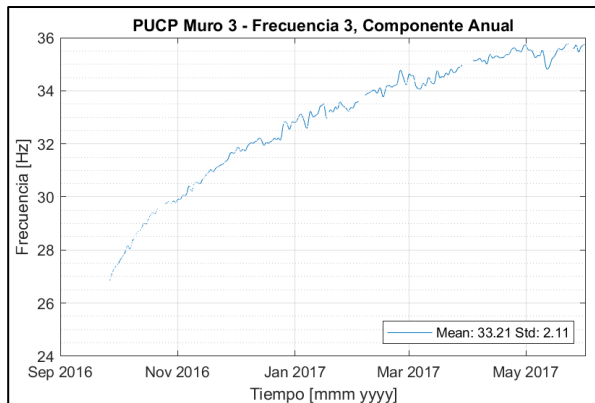
### A.4.27. Muro Tipo III – Filtrado Frecuencia Modal 3



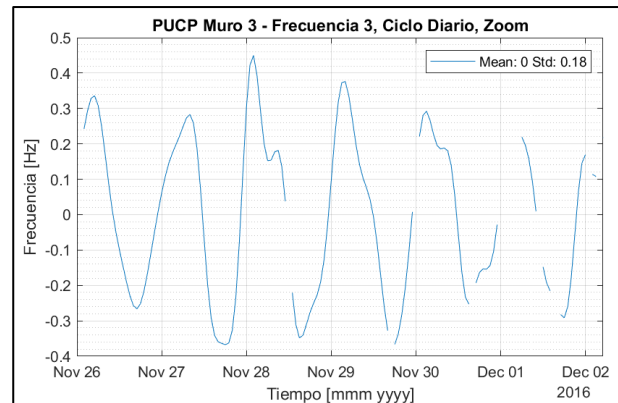
**Figura 0.113: Muro Tipo III, frecuencia modal 3. Acercamiento a la transformada de Fourier de la señal.**



**Figura 0.114: Muro Tipo III, frecuencia modal 3. Señal filtrada reconstruida vs señal original.**



**Figura 0.115: Muro Tipo III, frecuencia modal 3. Componente estacional.**



**Figura 0.116: Muro Tipo III, frecuencia modal 3. Componente diaria.**

Detalles del proceso de filtrado:

- Se identificaron y filtraron 3 componentes. Además, se filtró la vecindad correspondiente de la componente 4, incluso no estando presente en la transformada de Fourier.
- Se considera el ciclo diario como la suma de las componentes 24hrs+12hrs+8hrs.
- Se observa el efecto del endurecimiento del muro en la componente estacional.

## C. Anexos Capitulo 5

### A.5.1. Torre Central – Desfase frecuencias modales, humedad absoluta

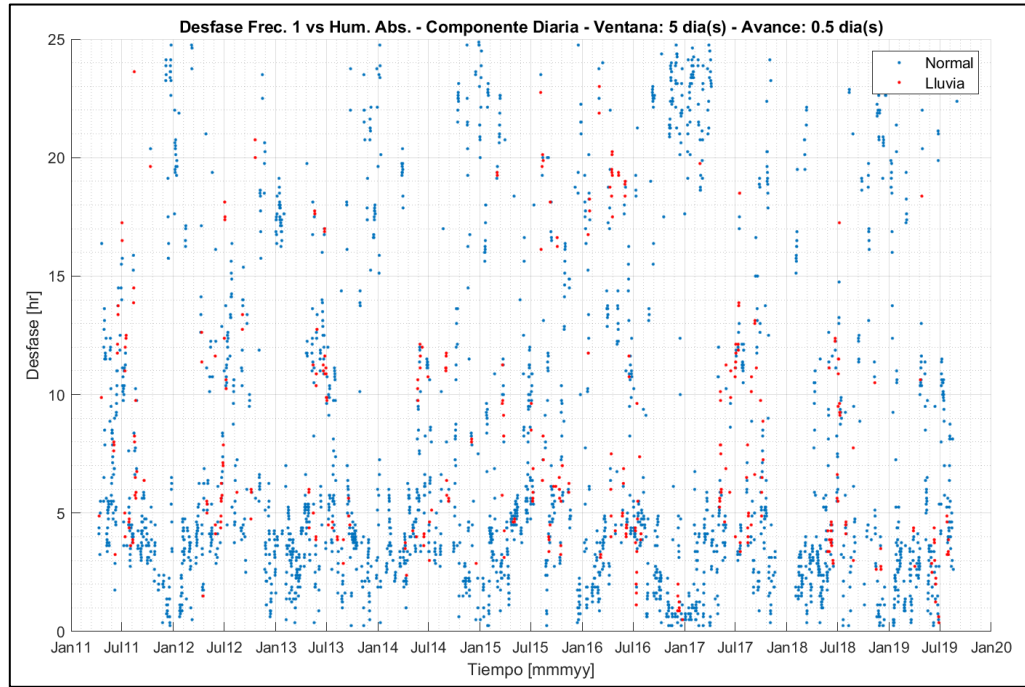


Figura 0.117: Torre Central, cálculo desfase entre componentes, humedad absoluta y frec. modal 1.

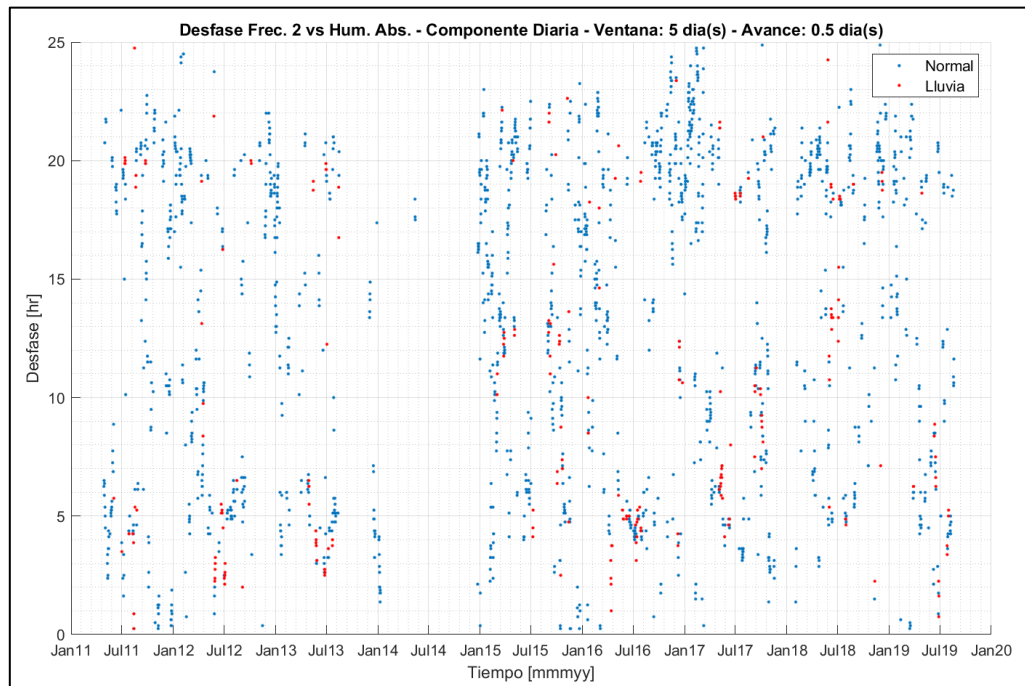


Figura 0.118: Torre Central, cálculo desfase entre componentes, humedad absoluta y frec. modal 2.

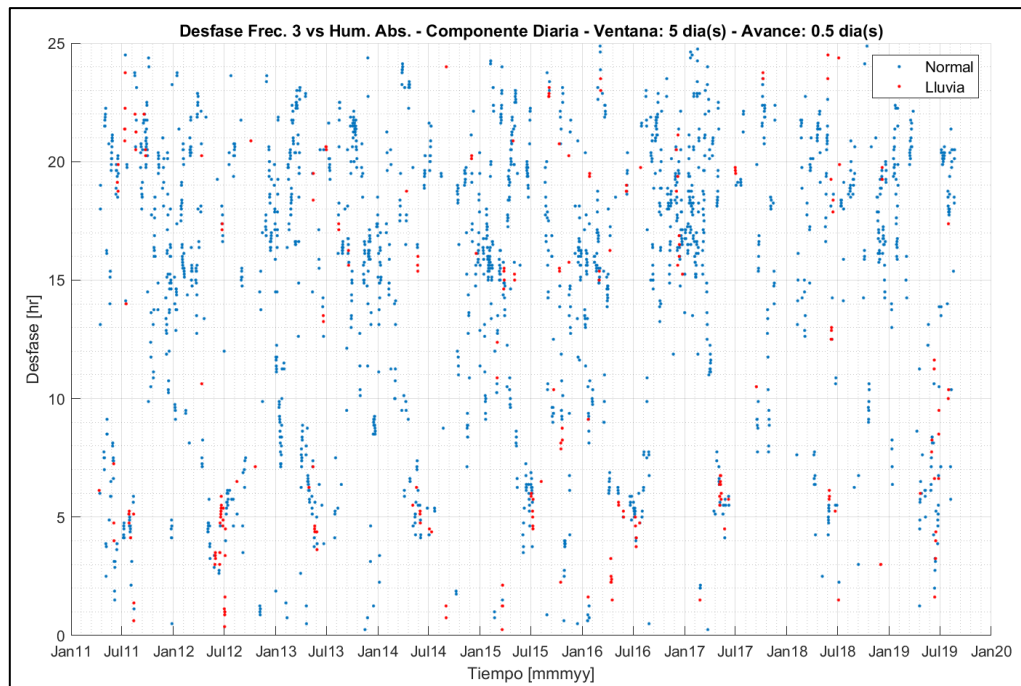
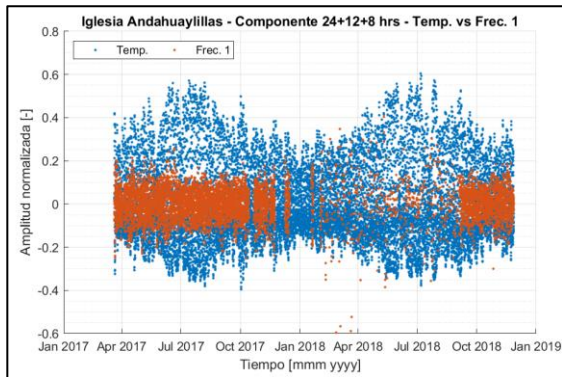
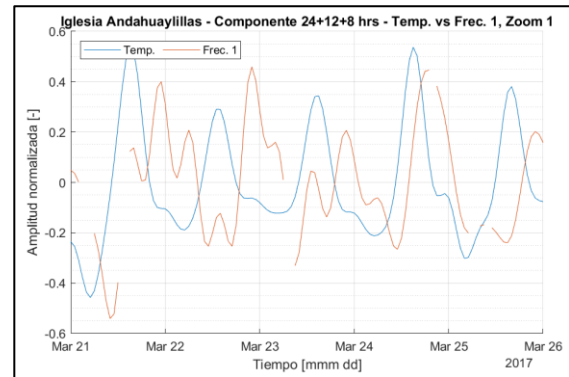


Figura 0.119: Torre Central, cálculo desfase entre componentes, humedad absoluta y frec. modal 3.

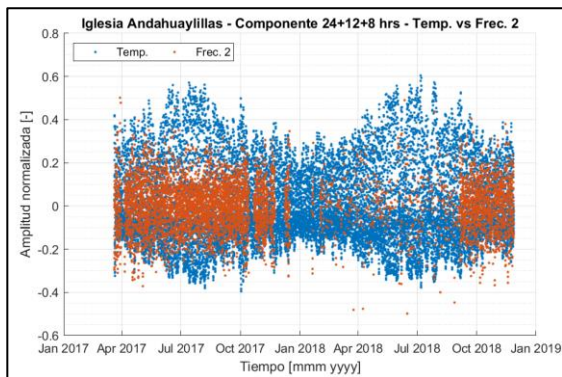
## A.5.2. Iglesia Andahuaylillas – Comparación componente diaria, temperatura.



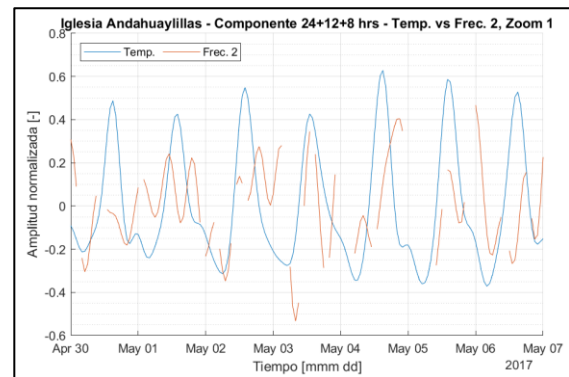
**Figura 0.120:** Iglesia Andahuaylillas, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 1.



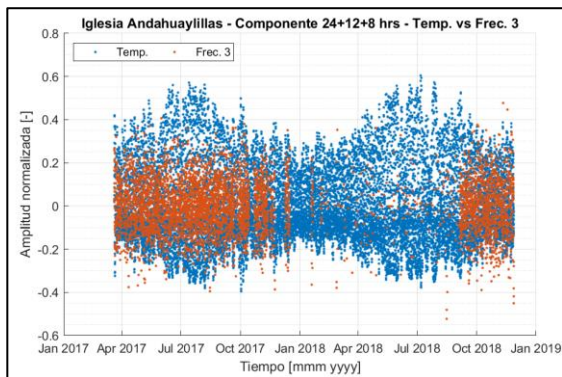
**Figura 0.121:** Iglesia Andahuaylillas, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 1, ventana de tiempo de 5 días.



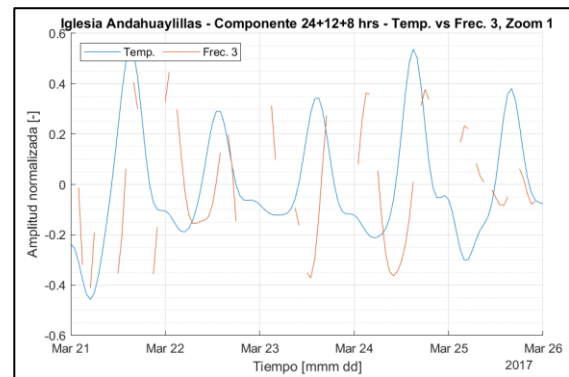
**Figura 0.122:** Iglesia Andahuaylillas, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 2.



**Figura 0.123:** Iglesia Andahuaylillas, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 2, ventana de tiempo de 7 días.

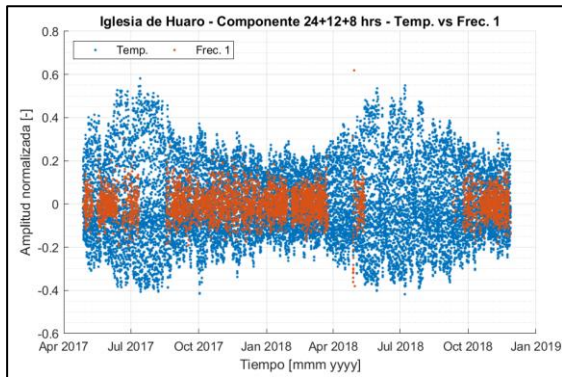


**Figura 0.124:** Iglesia Andahuaylillas, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 3.

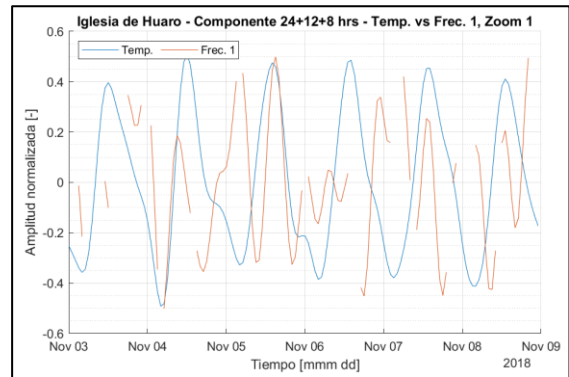


**Figura 0.125:** Iglesia Andahuaylillas, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 3, ventana de tiempo de 5 días.

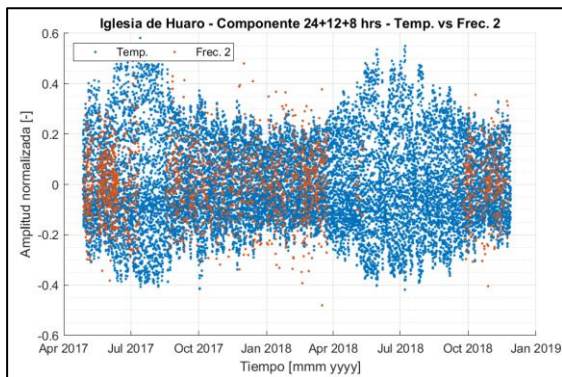
### A.5.3. Iglesia de Huaro – Comparación componente diaria, temperatura.



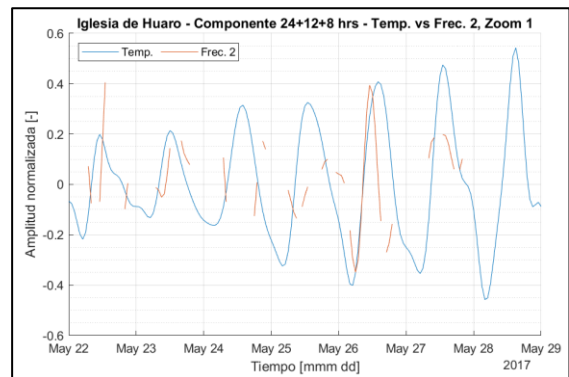
**Figura 0.126:** Iglesia de Huaro, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 1.



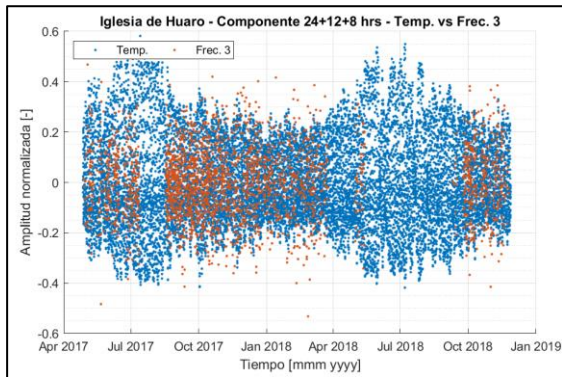
**Figura 0.127:** Iglesia de Huaro, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 1, ventana de tiempo de 6 días.



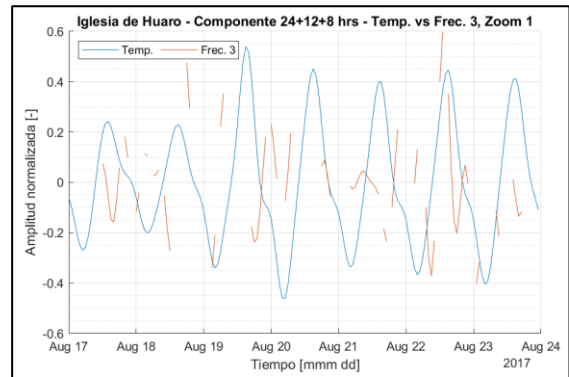
**Figura 0.128:** Iglesia de Huaro, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 2.



**Figura 0.129:** Iglesia de Huaro, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 2, ventana de tiempo de 7 días.



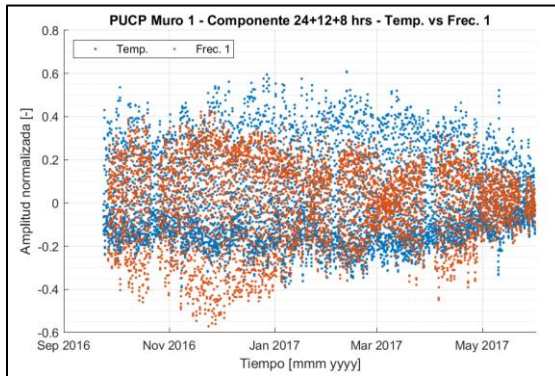
**Figura 0.130:** Iglesia de Huaro, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 3.



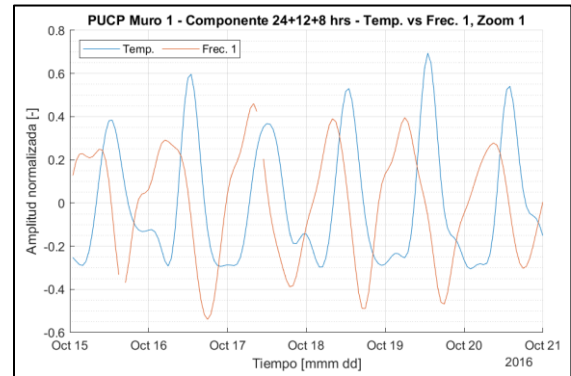
**Figura 0.131:** Iglesia de Huaro, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 3, ventana de tiempo de 7 días.



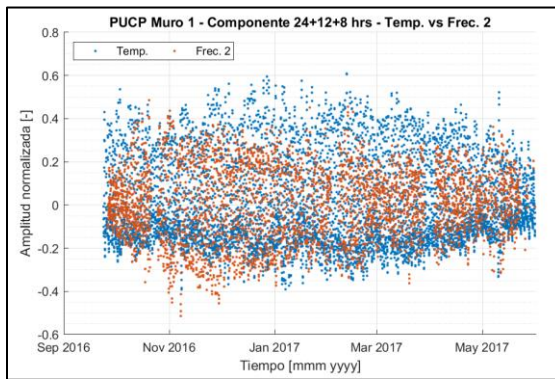
### A.5.4. Muro Tipo I – Comparación componente diaria, temperatura.



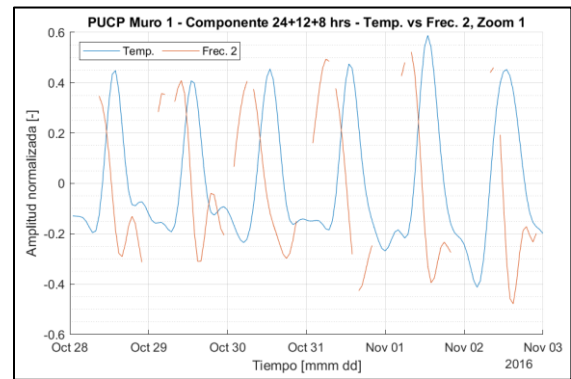
**Figura 0.132: Muro Tipo I, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 1.**



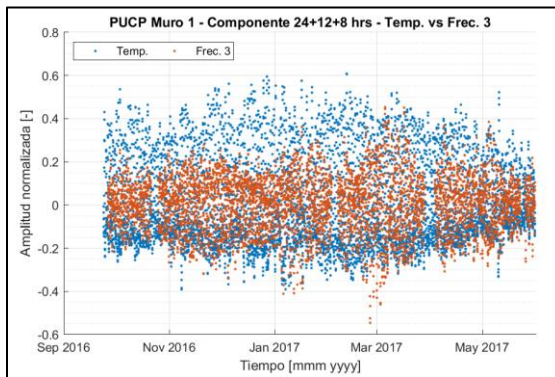
**Figura 0.133: Muro Tipo I, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 1, ventana de tiempo de 6 días.**



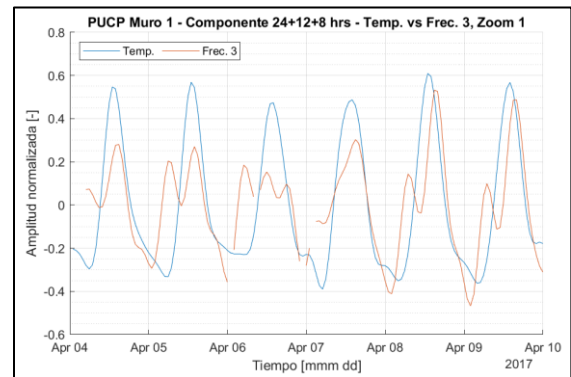
**Figura 0.134: Muro Tipo I, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 2.**



**Figura 0.135: Muro Tipo I, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 2, ventana de tiempo de 6 días.**

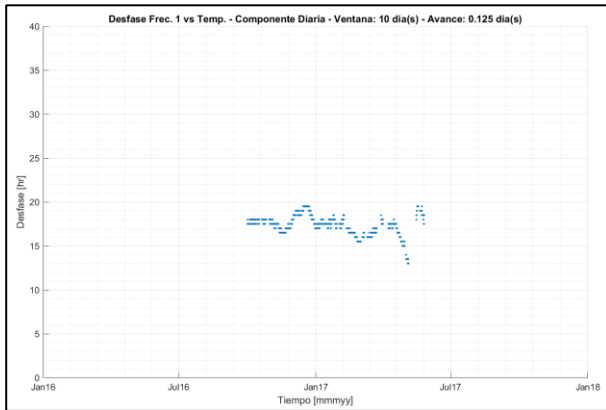


**Figura 0.136: Muro Tipo I, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 3.**

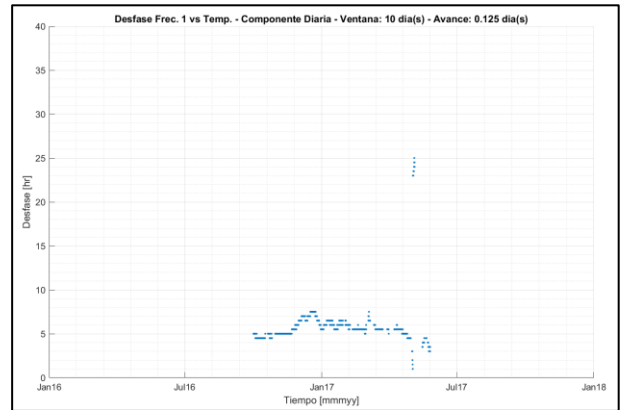


**Figura 0.137: Muro Tipo I, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 3, ventana de tiempo de 6 días.**

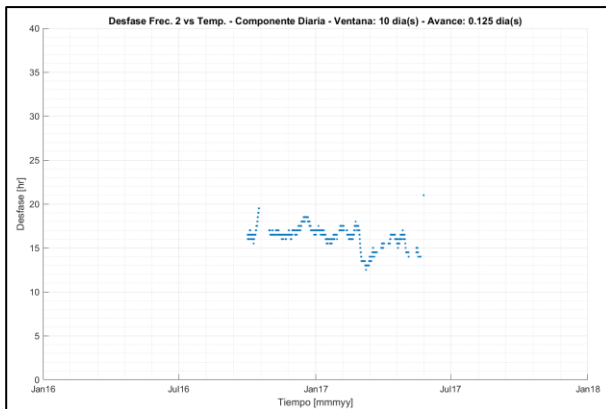
### A.5.5. Muro Tipo I – Desfase Componente Diaria, comparación frecuencias modales invertidas y no invertidas.



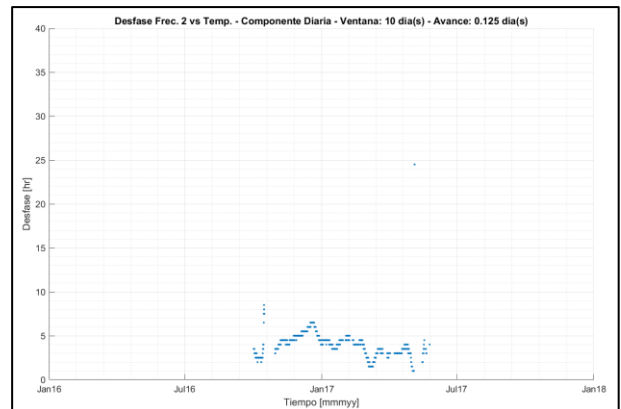
**Figura 0.138: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 1.**



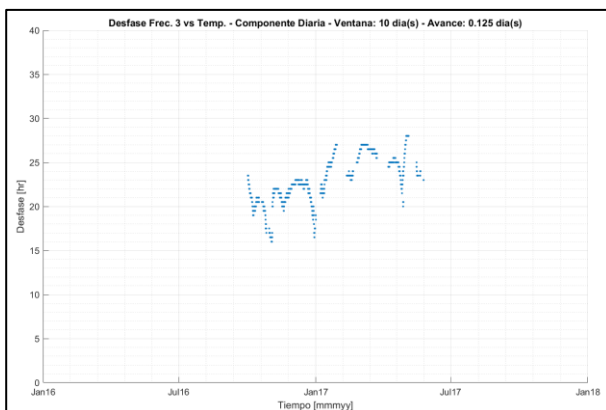
**Figura 0.139: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 1 (invertida).**



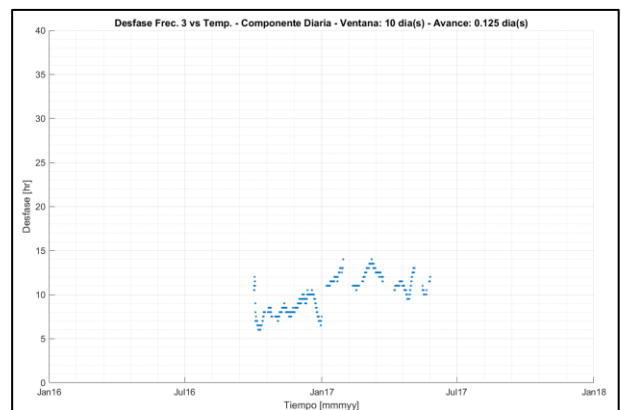
**Figura 0.140: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 2.**



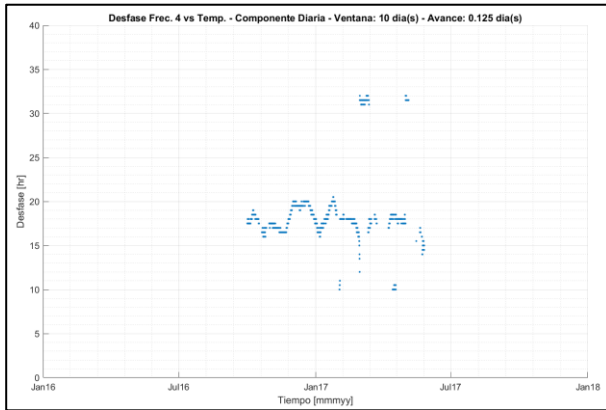
**Figura 0.141: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 2 (invertida).**



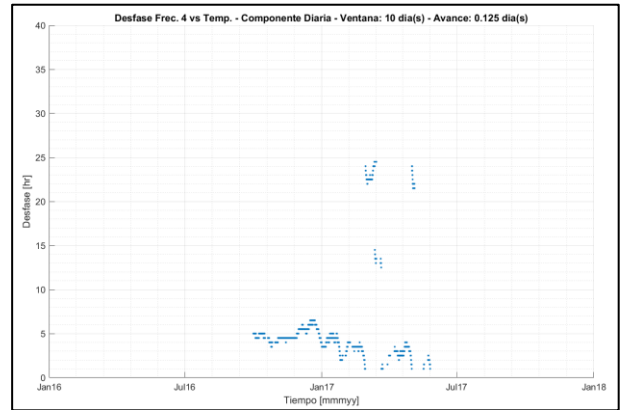
**Figura 0.142: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 3.**



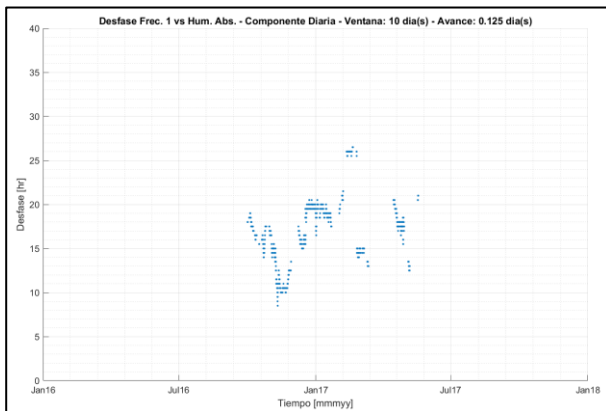
**Figura 0.143: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 3 (invertida).**



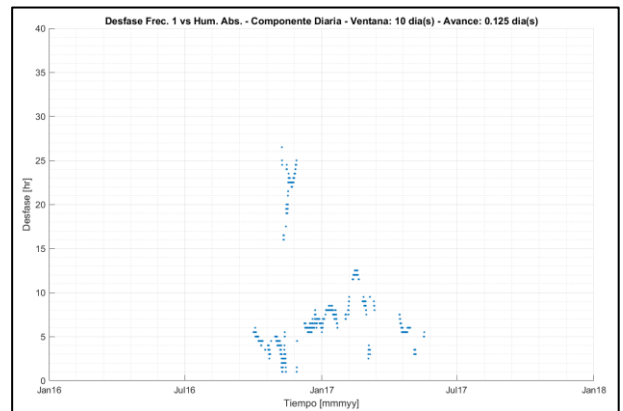
**Figura 0.144: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 4.**



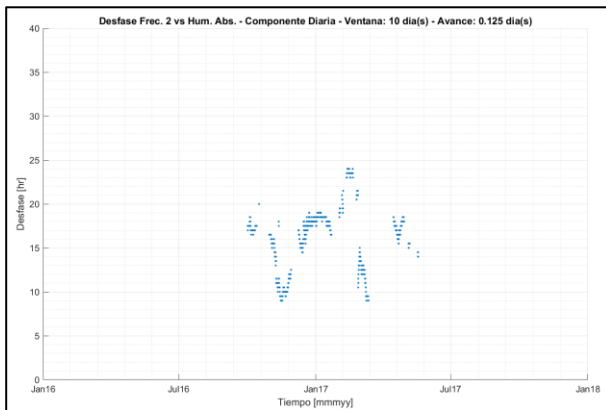
**Figura 0.145: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 4 (invertida).**



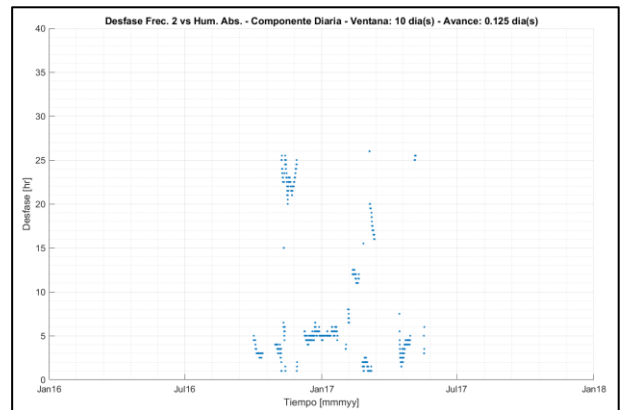
**Figura 0.146: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 1.**



**Figura 0.147: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 1 (invertida).**

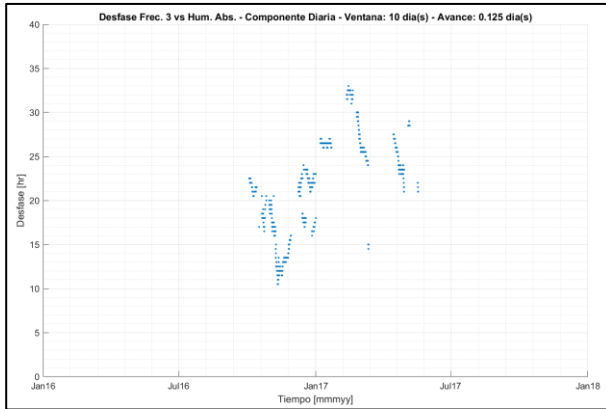


**Figura 0.148: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 2.**

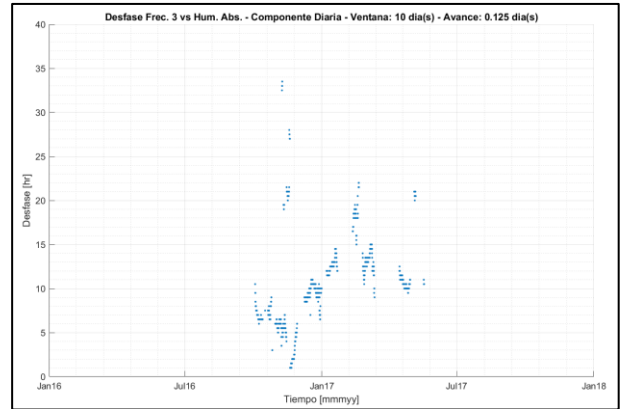


**Figura 0.149: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 2 (invertida).**

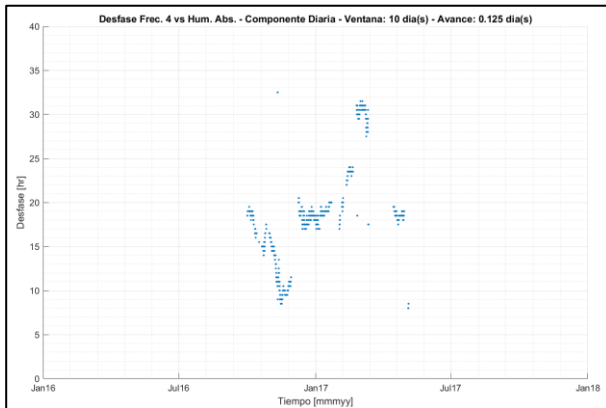




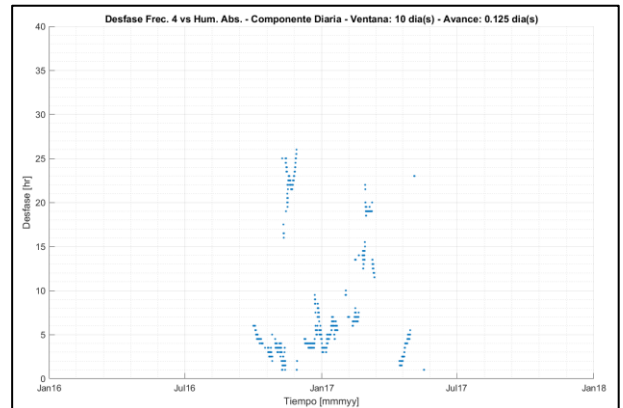
**Figura 0.150: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 3.**



**Figura 0.151: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 3 (invertida).**

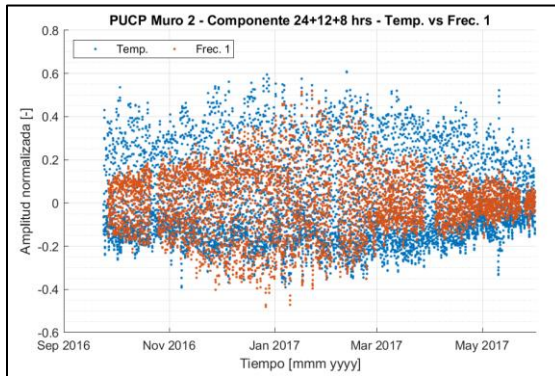


**Figura 0.152: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 4.**

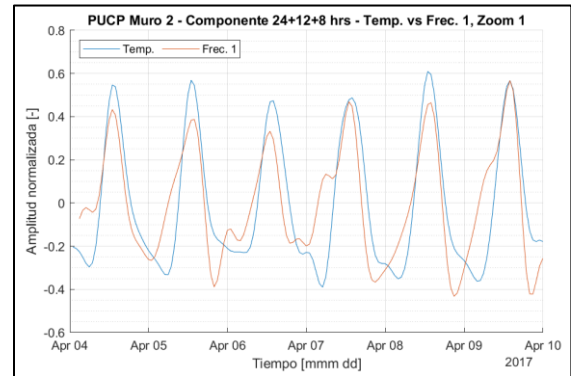


**Figura 0.153: Muro Tipo I, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 4 (invertida).**

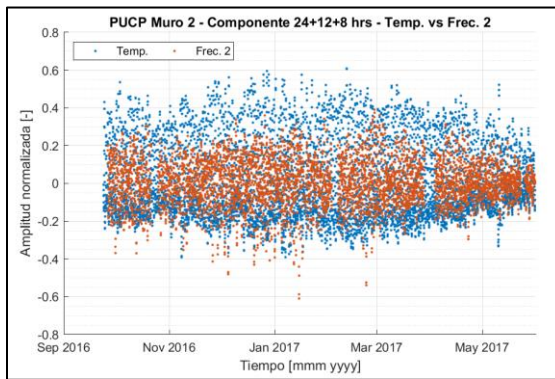
### A.5.6. Muro Tipo II – Comparación componente diaria, temperatura.



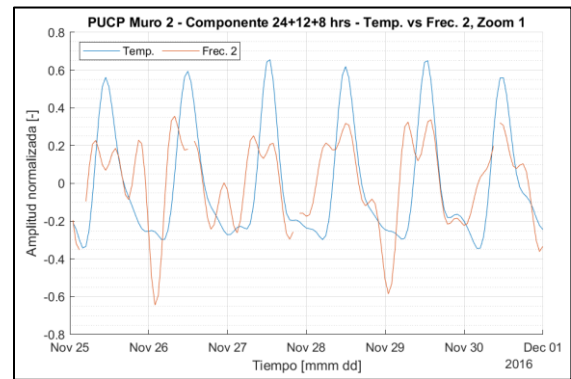
**Figura 0.154: Muro Tipo II, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 1.**



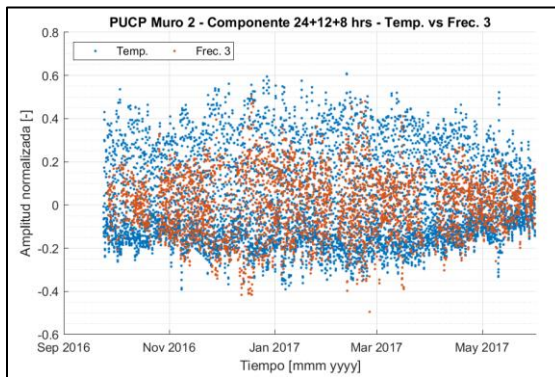
**Figura 0.155: Muro Tipo II, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 1, ventana de tiempo de 6 días.**



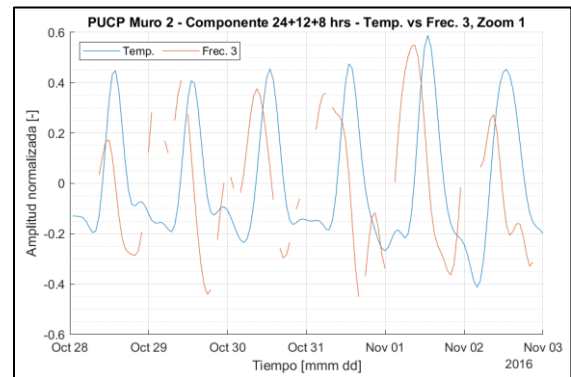
**Figura 0.156: Muro Tipo II, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 2.**



**Figura 0.157: Muro Tipo II, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 2, ventana de tiempo de 6 días.**

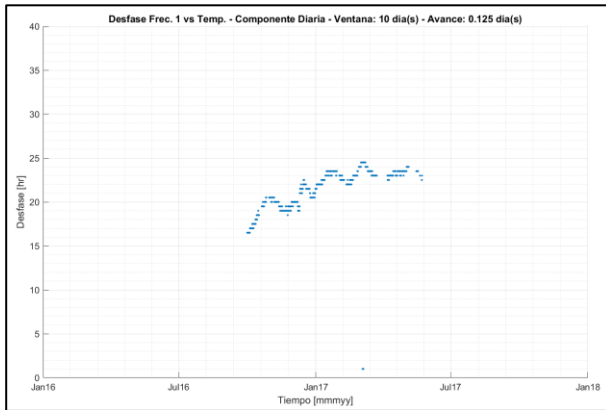


**Figura 0.158: Muro Tipo II, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 3.**

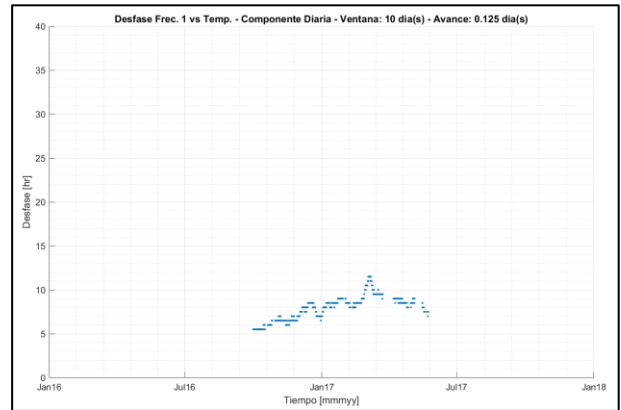


**Figura 0.159: Muro Tipo II, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 3, ventana de tiempo de 6 días.**

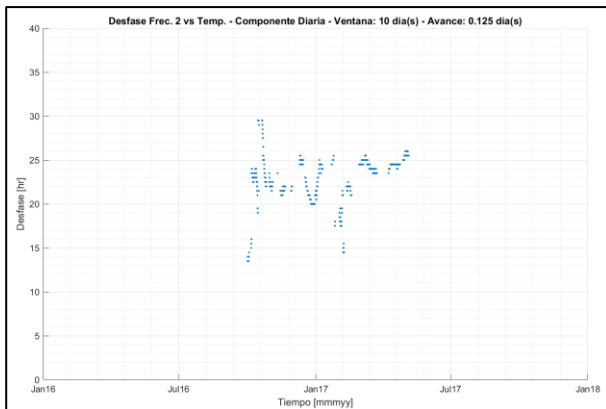
### A.5.7. Muro Tipo II – Desfase Componente Diaria, comparación frecuencias modales invertidas y no invertidas.



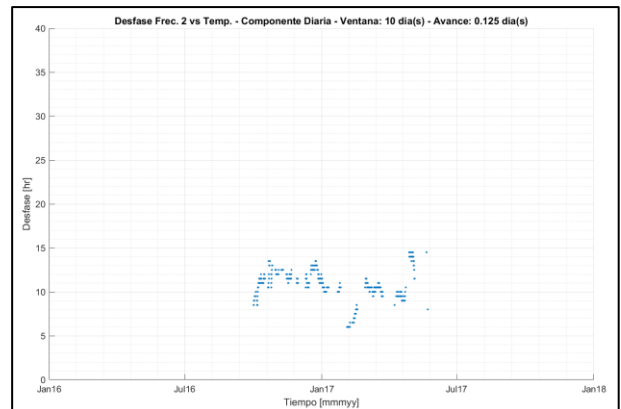
**Figura 0.160: Muro Tipo II, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 1.**



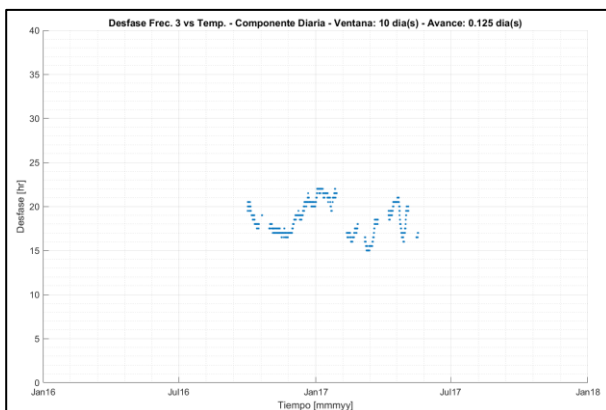
**Figura 0.161: Muro Tipo II, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 1 (invertida).**



**Figura 0.162: Muro Tipo II, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 2.**



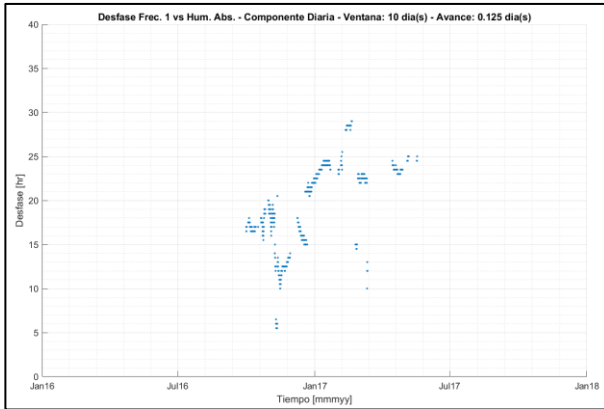
**Figura 0.163: Muro Tipo II, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 2 (invertida).**



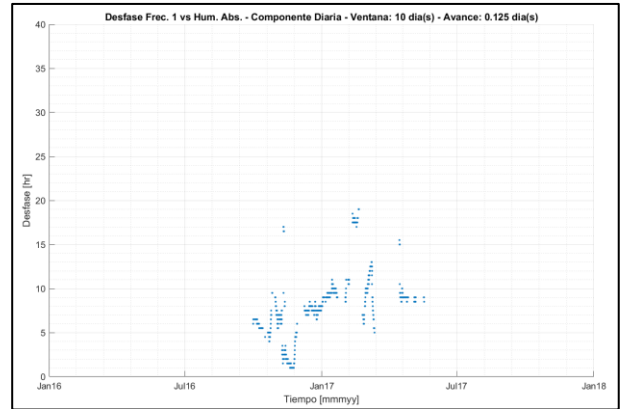
**Figura 0.164: Muro Tipo II, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 3.**



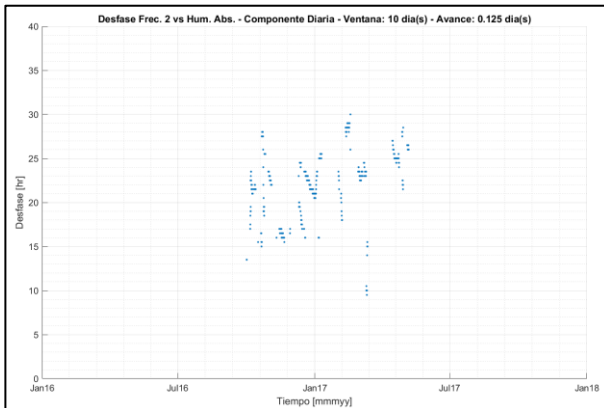
**Figura 0.165: Muro Tipo II, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 3 (invertida).**



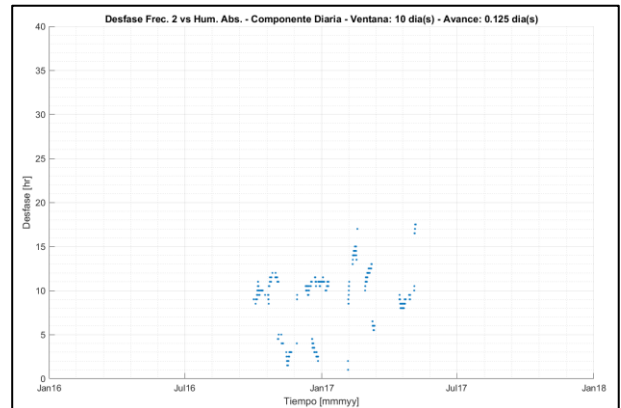
**Figura 0.166: Muro Tipo II, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 1.**



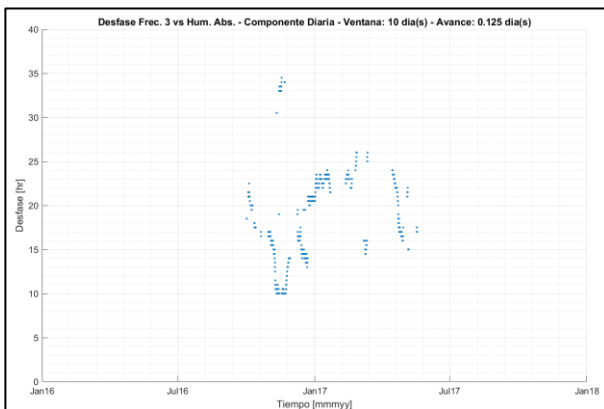
**Figura 0.167: Muro Tipo II, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 1 (invertida).**



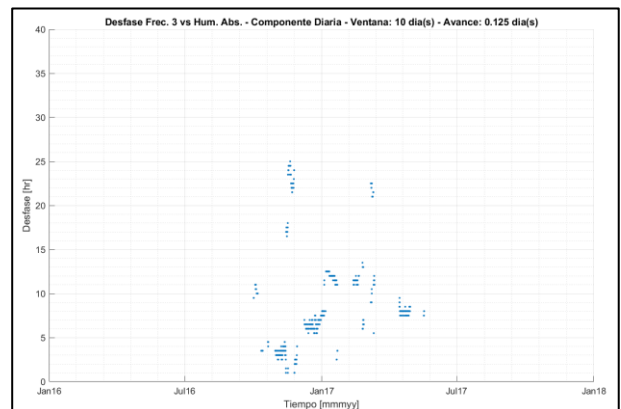
**Figura 0.168: Muro Tipo II, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 2.**



**Figura 0.169: Muro Tipo II, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 2 (invertida).**

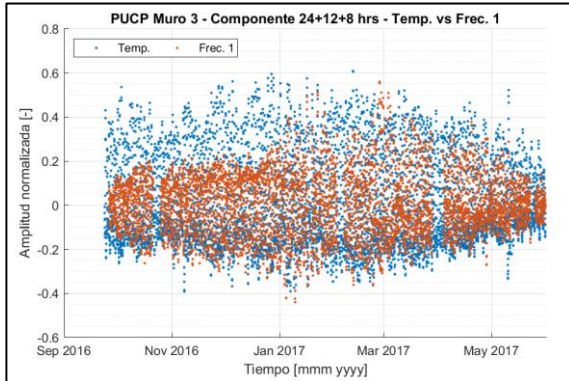


**Figura 0.170: Muro Tipo II, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 3.**

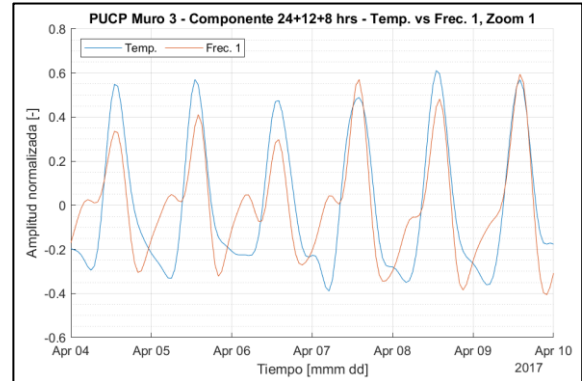


**Figura 0.171: Muro Tipo II, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 3 (invertida).**

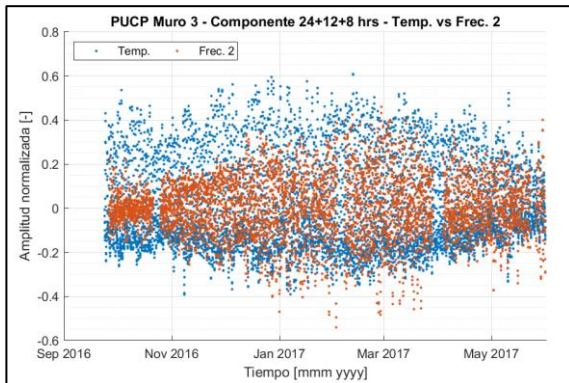
### A.5.8. Muro Tipo III – Comparación componente diaria, temperatura.



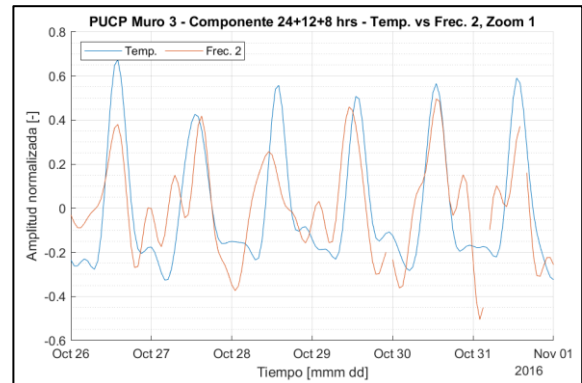
**Figura 0.172: Muro Tipo III, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 1.**



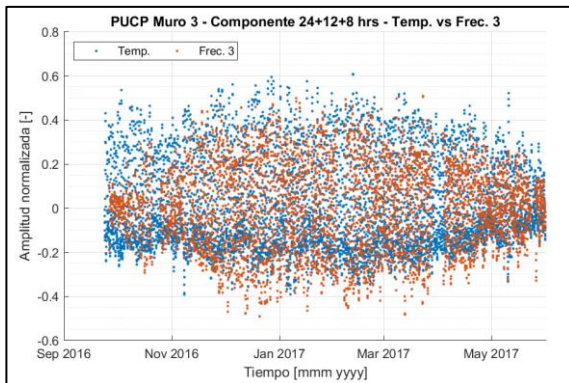
**Figura 0.173: Muro Tipo III, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 1, zoom diario.**



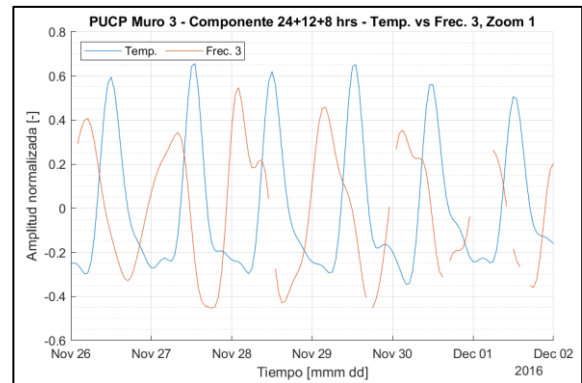
**Figura 0.174: Muro Tipo III, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 2.**



**Figura 0.175: Muro Tipo III, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 2, zoom diario.**

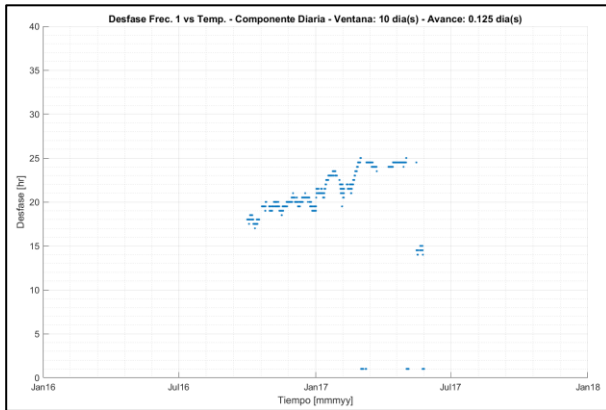


**Figura 0.176: Muro Tipo III, comparación componente diaria de temperatura ambiental y frec. 3.**

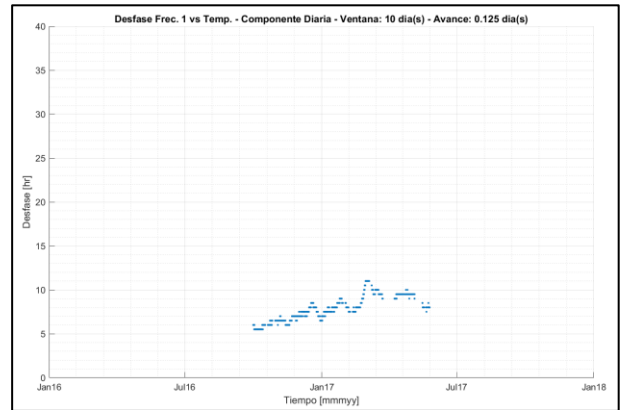


**Figura 0.177: Muro Tipo III, componente diaria de temperatura ambiental y frec. 3, zoom diario.**

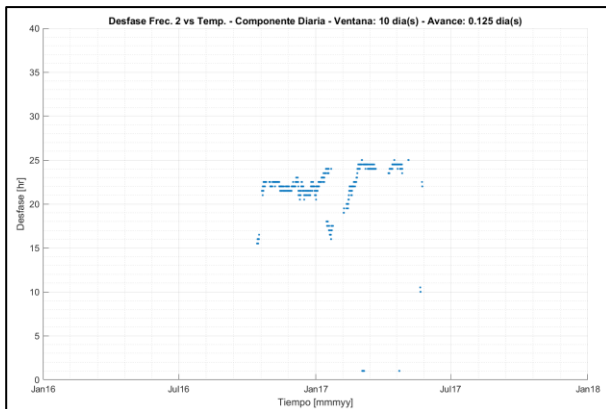
### A.5.9. Muro Tipo III – Desfase Componente Diaria, comparación frecuencias modales invertidas y no invertidas.



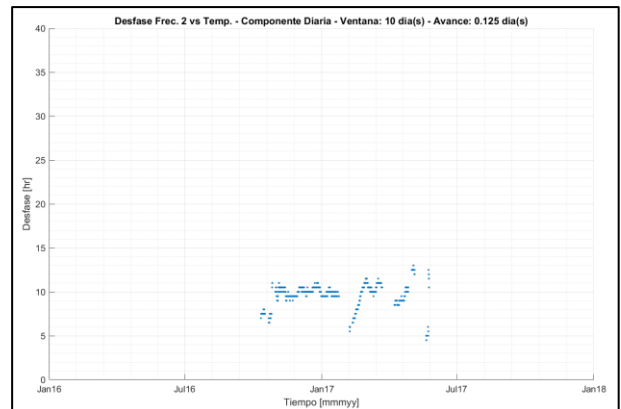
**Figura 0.178: Muro Tipo III, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 1.**



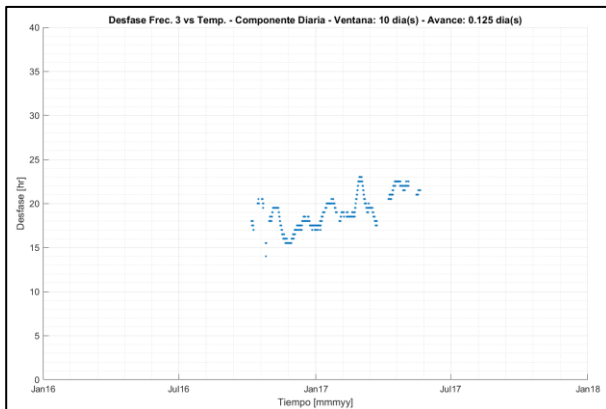
**Figura 0.179: Muro Tipo III, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 1 (invertida).**



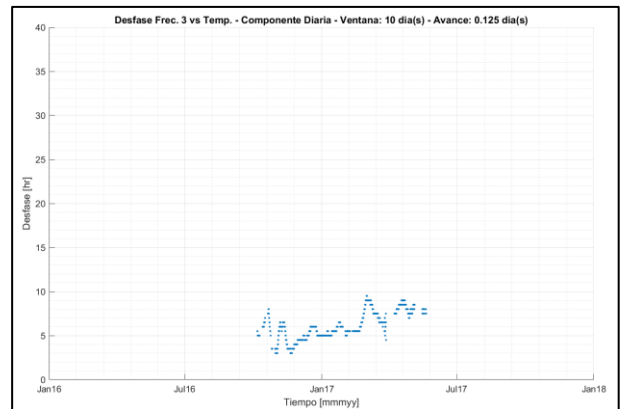
**Figura 0.180: Muro Tipo III, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 2.**



**Figura 0.181: Muro Tipo III, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 2 (invertida).**

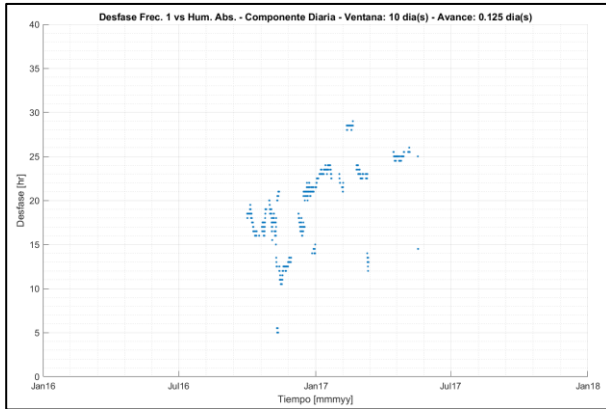


**Figura 0.182: Muro Tipo III, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 3.**

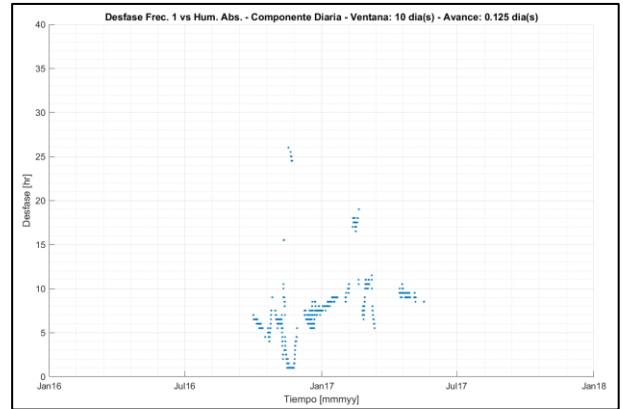


**Figura 0.183: Muro Tipo III, cálculo desfase comp. diaria, temperatura ambiental y frec. modal 3 (invertida).**

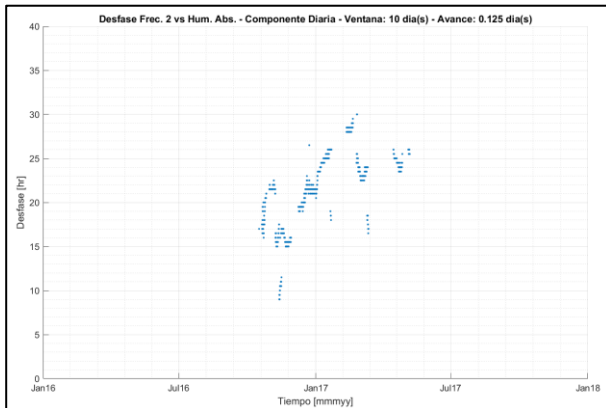




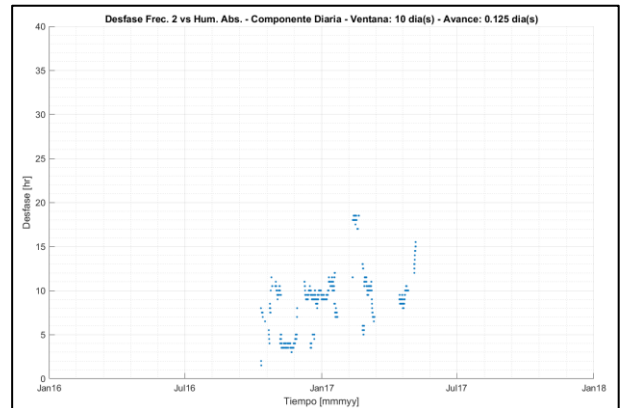
**Figura 0.184: Muro Tipo III, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 1.**



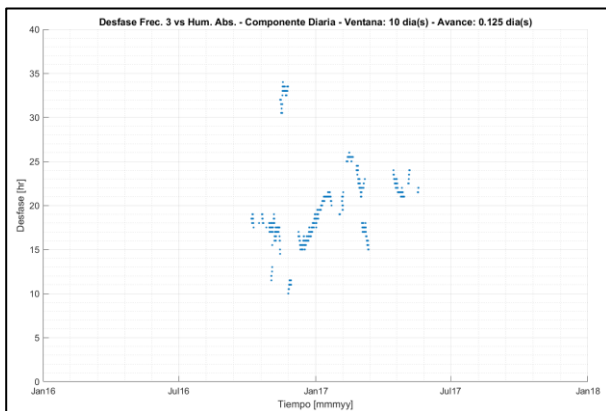
**Figura 0.185: Muro Tipo III, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 1 (invertida).**



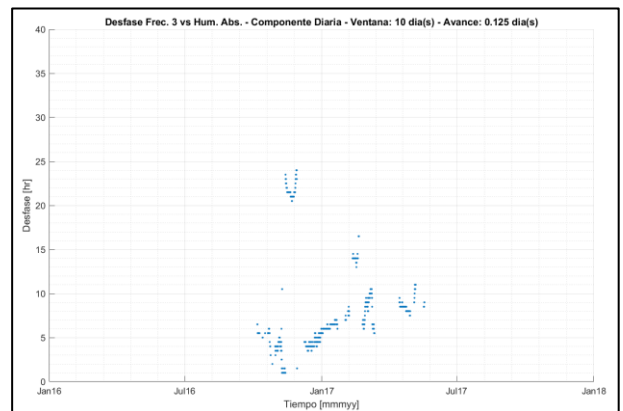
**Figura 0.186: Muro Tipo III, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 2.**



**Figura 0.187: Muro Tipo III, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 2 (invertida).**



**Figura 0.188: Muro Tipo III, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 3.**



**Figura 0.189: Muro Tipo III, cálculo desfase comp. diaria, humedad absoluta y frec. modal 3 (invertida).**