



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**CÁLCULO DE INFILTRACIONES DE AIRE EN VIVIENDAS DE RED NACIONAL  
DE MONITOREO POR MEDIO DE METODOLOGÍA ALTERNATIVA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

NICOLÁS JAIME OLIVA SAN FELIÚ

**PROFESOR GUÍA:**

ÁNGEL ANDRÉS NAVARRETE TRONCOSO

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

MATÍAS YACHÁN VERA

DAVID CAMPUSANO BROWN

SANTIAGO DE CHILE

2018

## **RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO PARA OPTAR AL**

**TÍTULO DE:** Ingeniero Civil

**POR:** Nicolás Jaime Oliva San Feliú

**FECHA:** 29/11/2018

**PROFESOR GUÍA:** Ángel Navarrete Troncoso

### **CÁLCULO DE INFILTRACIONES DE AIRE EN VIVIENDAS DE RED NACIONAL DE MONITOREO POR MEDIO DE METODOLOGÍA ALTERNATIVA**

El presente Trabajo de Título tiene como finalidad describir cuantitativamente la tasa de infiltraciones en una serie de viviendas que forman parte de la Red Nacional de Monitoreo (ReNaM) por medio de la metodología del gas trazador. Así, se busca analizar qué tan factible es establecer la metodología al tener mediciones disponibles a partir de un Sistema de Medición de Variables Ambientales (SMVA).

La gran ventaja de utilizar la metodología del gas trazador radica en que no se hace necesario intervenir las viviendas, ya que como gas trazador se utiliza el vapor de agua. De esta manera, la ecuación se evalúa en base a los registros de variables climáticas obtenidos de la base de datos de la ReNaM durante el año 2017.

En primer lugar, se estudian los conceptos de calor, temperatura y humedad para tener una noción de su influencia sobre las infiltraciones de aire y así proceder a investigar sobre el funcionamiento de la ReNaM y las posibles limitaciones que se presentan al implementar la metodología de cálculo.

Para la aplicación concreta del método, se analizaron las variables de humedad relativa y temperatura que son utilizadas como *entradas* para obtener la humedad absoluta y posteriormente calcular la tasa de renovaciones de aire. De ese análisis, se logran acotar los registros a utilizar para calcular la tasa de infiltración en horarios donde las variables presenten un comportamiento más afín a lo que teóricamente se espera.

Del cálculo de la tasa de infiltraciones se desprende que existe una alta variabilidad en los resultados obtenidos por vivienda, reflejados en una alta desviación estándar, por lo que el obtener un dato promedio en la tasa de renovaciones por vivienda resulta altamente variable. Sin embargo, al analizar las viviendas bajo ciertas propiedades intrínsecas a estas se obtiene que ciertas características tienden a presentar viviendas menos estancas; como lo es el uso de materialidad de muros liviana, viviendas sin aislación térmica de muros o fuera de la reglamentación térmica actual y ventanas en base a vidrio simple.

Para que la metodología pueda ser aplicada de forma más verosímil, se plantean modificaciones que se podrían ser implementadas en el SMVA; como la reducción de los periodos de registro de variables o la implementación de anemómetros adicionales en la red.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, no puedo dejar de agradecer a mi familia y mis padres que han sido el pilar fundamental y la principal motivación en mis estudios. Todo logro conseguido es un reflejo de su cariño y apoyo.

A mi profesor, por la paciencia y las oportunidades brindadas para llevar a cabo este trabajo.

A las amistades forjadas en estos largos años de universidad por los almuerzos compartidos y los momentos disfrutados en este camino; a los talquinos y colbunenses por hacerme sentir siempre en casa a pesar de estar a unos cuantos kilómetros de distancia; y a Cristina por estar siempre a mi lado en estos últimos años.

En general, agradezco a todas las personas que me han brindado su ayuda en este largo camino.

# TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción y Objetivos.....	1
1.1	Alcance .....	2
1.2	Objetivos .....	3
1.2.1	Objetivo general .....	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
1.3	Simbología .....	4
2	Temperatura y Humedad .....	5
2.1	Calor y Temperatura.....	5
2.1.1	Mecanismos de transferencia de calor.....	5
2.1.2	Comodidad térmica .....	6
2.1.3	Temperatura del aire .....	7
2.1.4	Disipación de calor en envolvente térmica .....	7
2.2	Humedad en el Aire .....	9
2.2.1	Permeabilidad de los materiales .....	12
2.2.2	Condensación .....	12
2.2.3	Vapor de agua como contaminante.....	12
2.2.4	Disipación de vapor de agua por renovaciones de aire .....	13
3	Calidad del Aire e Infiltraciones.....	14
3.1	Características de Ventilación e Infiltraciones .....	14
3.2	Vientos y su influencia .....	16
3.2.1	Presión dinámica de viento.....	16
3.2.2	Dirección de los vientos.....	17
3.2.3	Velocidad de Vientos.....	18
3.2.4	Viento en entorno urbano .....	19
3.3	Temperatura y su influencia.....	20
4	Base de Datos e Instrumentación .....	21
4.1	Características de ReNaM .....	21
4.1.1	Visión de ReNaM.....	21
4.1.2	Objetivo General .....	21
4.1.3	Hoja de Ruta .....	22
4.1.4	Funcionamiento de ReNaM .....	22
4.2	Netatmo Weather Station.....	23

4.3	Viviendas y Características.....	25
4.3.1	Características de las ciudades .....	26
5	Metodologías de cálculo de Infiltraciones.....	29
5.1	Metodología Estándar – <i>Blower Door Test</i> .....	29
5.2	Metodología del Gas Trazador.....	30
5.2.1	Decaimiento de Concentración .....	33
6	Limitaciones y Procedimiento .....	36
6.1	Limitaciones del método .....	36
6.2	Procedimiento .....	37
6.3	Preparación de muestra.....	37
6.3.1	Filtros y muestras .....	38
6.4	Perspectivas de análisis .....	41
6.4.1	Año de construcción .....	41
6.4.2	Materialidad predominante .....	43
6.4.3	Tipo de agrupación.....	44
6.4.4	Nivel socioeconómico de ocupantes .....	45
6.4.5	Tipo de ventanas .....	45
6.4.6	Resumen.....	46
7	Resultados y análisis .....	48
7.1	Distribución de variables.....	48
7.1.1	Análisis comparativo según registros de Quinta Normal.....	53
7.1.2	Análisis de Humedad Absoluta .....	55
7.2	Distribución de infiltraciones .....	60
7.3	Renovaciones medias según perspectivas.....	66
7.3.1	Materialidad.....	67
7.3.2	Año de construcción .....	68
7.3.3	Tipo de agrupación.....	69
7.3.4	Nivel socioeconómico (NSE).....	71
7.3.5	Tipo de ventanas .....	72
7.4	Análisis de resultados.....	73
7.4.1	Humedad Absoluta .....	73
7.4.2	Infiltraciones de aire .....	73
7.4.3	Análisis de perspectivas .....	74
8	Conclusiones y comentarios .....	77
9	Bibliografía .....	80

10	Anexos .....	82
10.1	Anexo 1: Especificaciones de Módulo Netatmo.....	82
10.2	Anexo 2: Informes de viento predominante anual (2017) .....	84
10.2.1	Antofagasta, Estación Cerro Moreno .....	84
10.2.2	Valparaíso, Estación Rodelillo .....	85
10.2.3	Santiago, Estación Quinta Normal .....	86
10.2.4	Temuco, Estación Maquehue .....	87
10.2.5	Coyhaique, Estación Teniente Vidal .....	88
10.3	Anexo 3: Informes solarimétricos.....	89
10.3.1	Informe Quinta Normal, mes de junio.....	89

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-I: COMPOSICIÓN DEL AIRE SECO A NIVEL DEL MAR. FUENTE: ICARO, MANUAL DEL AIRE.....	9
TABLA 3-I: RENOVACIONES DE AIRE POR HORA SUGERIDAS PARA DIFERENTES ESPACIOS TOMANDO COMO UNIDAD ACH50. FUENTE: (COORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LA CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN, 2008). ....	15
TABLA 3-II: DIRECCIÓN PREDOMINANTE DE VIENTO DURANTE AÑO 2017 EN CIUDADES RENAM.....	18
TABLA 3-III: VELOCIDAD MEDIA ANUAL DE VIENTO POR CIUDAD. FUENTE: TABLA 3.3 (CITEC UBB, 2013). ....	19
TABLA 4-I: ALERTAS DE VENTILACIÓN NETATMO WEATHER STATION. ....	24
TABLA 5-I: GASES TRAZADORES Y SEGURIDAD. FUENTE: ASTM E741-11. ....	30
TABLA 5-II: METODOLOGÍAS DE GAS TRAZADOR. FUENTE: (NAVARRETE, 2016). ....	32
TABLA 6-I: RESUMEN MENSUAL DE VELOCIDADES DE VIENTO Y ORIENTACIÓN (ESTACIÓN QUINTA NORMAL, SANTIAGO). FUENTE: DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE. ....	38
TABLA 6-II: ZONAS TÉRMICAS SEGÚN UBICACIÓN DE VIVIENDAS. ....	42
TABLA 6-III: DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS RESPECTO A AÑO DE CONSTRUCCIÓN.....	42
TABLA 6-IV: DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS RESPECTO A MATERIALIDAD PREDOMINANTE EN ENVOLVENTE.....	44
TABLA 6-V: DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS RESPECTO A TIPO DE AGRUPACIÓN.....	44
TABLA 6-VI: DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS RESPECTO A NIVEL SOCIO-ECONÓMICO.....	45
TABLA 6-VII: DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS RESPECTO A TIPO DE VENTANA. ....	45
TABLA 7-I: ANÁLISIS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA EN INTERIOR Y EXTERIOR PARA LA CIUDAD DE SANTIAGO. ....	48
TABLA 7-II: CARACTERÍSTICAS DE VIVIENDAS DE QUINTA NORMAL. ....	53
TABLA 7-III: ANÁLISIS DE HUMEDAD ABSOLUTA INTERIOR Y EXTERIOR PARA LA CIUDAD DE SANTIAGO.....	57
TABLA 7-IV: ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE VARIABLES DE HUMEDAD ABSOLUTA.....	61
TABLA 7-V: PROMEDIOS DE HUMEDADES Y RENOVACIONES BAJO RANGOS DE DIFERENCIA DE TEMPERATURA INTERIOR Y EXTERIOR. ....	63
TABLA 7-VI: PROMEDIOS DE HUMEDADES Y RENOVACIONES BAJO RANGOS DE $\Delta HA$ .....	63
TABLA 7-VII: PROMEDIOS DE HUMEDADES Y TEMPERATURAS BAJO RANGOS DE RENOVACIONES. ....	64
TABLA 7-VIII: PROMEDIO DE VARIABLES SEGÚN HORARIO.....	66
TABLA 7-IX: RENOVACIONES SEGÚN MATERIALIDAD PREDOMINANTE EN ENVOLVENTE DE VIVIENDA. ....	67
TABLA 7-X: RENOVACIONES SEGÚN AÑO DE CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA.....	68
TABLA 7-XI: RENOVACIONES SEGÚN TIPO DE AGRUPACIÓN DE VIVIENDA. ....	69
TABLA 7-XII: RENOVACIONES SEGÚN NIVEL SOCIOECONÓMICO DE FAMILIA HABITANTE.....	71
TABLA 7-XIII: RENOVACIONES SEGÚN TIPO DE VENTANA EN ENVOLVENTE DE VIVIENDA. ...	72

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: VARIACIÓN DE TEMPERATURA EN CERRAMIENTO POR MECANISMO DE CONDUCCIÓN. FUENTE: (MARTÍN MONROY, 2010).....	8
FIGURA 2-2: CARTA PSICOMÉTRICA. FUENTE: <i>PSYCHTOOL</i> . ....	11
FIGURA 3-1: POSIBLES PUNTOS DE INFILTRACIÓN DE AIRE EN UNA HABITACIÓN. ....	15
FIGURA 3-2: EJEMPLO DE COEFICIENTES EÓLICOS. FUENTE: NCh432.Of71.....	17
FIGURA 3-3: VELETA Y ANEMÓMETRO. ....	17
FIGURA 3-4: EJEMPLOS DE FENÓMENOS AERODINÁMICOS QUE GENERAN LAS EDIFICACIONES. FUENTE: (ICARO, MANUAL DEL AIRE). ....	19
FIGURA 4-1: HOJA DE RUTA DE RENAM. FUENTE: (WWW.RENAM.CL). ....	22
FIGURA 4-2: ESQUEMA DE SMVA. FUENTE: (WWW.RENAM.CL).....	23
FIGURA 4-3: INTERFAZ PARA TELÉFONOS MÓVILES DE NETATMO. FUENTE: (WWW.NETATMO.COM). ....	24
FIGURA 4-4: DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS POR CIUDADES. ....	25
FIGURA 4-5: PROMEDIOS MENSUALES DE HUMEDAD RELATIVA Y VARIABLES TÉRMICAS EN LA CIUDAD DE SANTIAGO SEGÚN TRES ESTACIONES PRINCIPALES. AÑO 2017. DATOS OBTENIDOS DE DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE. ....	27
FIGURA 5-1: EQUIPO VENTILADOR PARA REALIZAR UN BLOWER DOOR TEST.....	29
FIGURA 5-2: CURVA ESPERADA EN DECAIMIENTO DE CONCENTRACIÓN. FUENTE: (PATEL, MITSINGAS, MILLER, & NEWELL, 2011).....	33
FIGURA 6-1: REGISTRO DE VELOCIDAD DEL VIENTO [M/S] DE ESTACIÓN PARQUE O'HIGGINS EN MESES DE MAYO A AGOSTO DEL 2017. FUENTE: SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE (SINCA). ....	39
FIGURA 6-2: TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES DE AÑO 2017 (ESTACIÓN QUINTA NORMAL, SANTIAGO). FUENTE: DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE.....	39
FIGURA 6-3: DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS DE MUESTRA 3 SEGÚN PERSPECTIVAS DE ANÁLISIS.....	47
FIGURA 7-1: DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA: A) INTERNA B) EXTERNA SEGÚN MUESTRA DE SANTIAGO EN MESES FRÍOS.....	49
FIGURA 7-2: DIFERENCIA ENTRE TEMPERATURA INTERIOR Y EXTERIOR DEL AIRE SECO. ....	50
FIGURA 7-3: DISTRIBUCIÓN DE HUMEDAD RELATIVA: A) INTERIOR B) EXTERIOR.....	51
FIGURA 7-4: MEDICIONES EXTERNAS DE: A) TEMPERATURA B) HUMEDAD RELATIVA. COMUNA DE QUINTA NORMAL. ....	54
FIGURA 7-5: CÁLCULO EXTERNO DE HUMEDAD ABSOLUTA. QUINTA NORMAL.....	55
FIGURA 7-6: GRÁFICO TRIDIMENSIONAL DE VARIACIÓN DE HUMEDAD ABSOLUTA RESPECTO A TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA. ....	56
FIGURA 7-7: VARIACIÓN DE HUMEDAD ABSOLUTA RESPECTO A: A) TEMPERATURA B) HUMEDAD RELATIVA.....	57
FIGURA 7-8: DISTRIBUCIÓN DE HUMEDAD ABSOLUTA: A) INTERIOR B) EXTERIOR.....	58
FIGURA 7-9: MEDIAS DE HUMEDAD ABSOLUTA A LO LARGO DEL DÍA.....	59
FIGURA 7-10: MEDIA DE HUMEDAD ABSOLUTA INTERIOR EN RANGO HORARIO EN DECAIMIENTO. ....	60
FIGURA 7-11: GRÁFICA EN TRES DIMENSIONES DE RENOVACIONES DE AIRE / HORA. ....	61
FIGURA 7-12: SENSIBILIDAD DE RAH A LA VARIACIÓN DE VARIABLES DE HUMEDAD ABSOLUTA.....	62

FIGURA 7-13: DISTRIBUCIÓN HORARIA DE REGISTROS EN DECAIMIENTO DE CONCENTRACIÓN. ....	64
FIGURA 7-14: DISTRIBUCIÓN DIARIA DE RENOVACIONES DE AIRE. ....	65
FIGURA 7-15: CURVAS DE RENOVACIONES DE AIRE EN HORARIO NOCTURNO SEGÚN MATERIALIDAD PREDOMINANTE EN ENVOLVENTE DE VIVIENDA. ....	67
FIGURA 7-16: CURVAS DE RENOVACIONES DE AIRE EN HORARIO NOCTURNO SEGÚN AÑO DE CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDA. ....	68
FIGURA 7-17: CURVAS DE RENOVACIONES DE AIRE EN HORARIO NOCTURNO SEGÚN TIPO DE AGRUPACIÓN DE VIVIENDA. ....	70
FIGURA 7-18: CURVAS DE RENOVACIONES DE AIRE EN HORARIO NOCTURNO SEGÚN NSE DE FAMILIA HABITANTE. ....	71
FIGURA 7-19: CURVAS DE RENOVACIONES DE AIRE EN HORARIO NOCTURNO SEGÚN TIPO DE VIDRIO EN VENTANAS DE VIVIENDA. ....	72

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Desde los inicios de las civilizaciones el hombre ha usado un *refugio* u *hogar* para protegerse de las inclemencias climáticas y de las posibles amenazas del entorno donde habita. Al pasar las distintas épocas, los objetivos de estos hogares o viviendas se han direccionado hacia mayores estándares de confort al interior de éstos, teniendo como principal repercusión un aumento en el uso de energía.

Según estudios, la edificación chilena destinada tanto a la vivienda como al comercio es responsable del 26% del uso final de energía, 34% de generación de residuos sólidos, 33% de las emisiones de gases de efecto invernadero y del 6% del uso de agua (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2013). Es por esto que la demanda energética en edificación se debiese entender como un estudio vital para efectuar políticas que no solo afectan a la economía nacional, sino que también a sus dimensiones éticas y sociales.

Tanto la operación y mantención de edificios ocupa un lugar significativo en el presupuesto de las familias, repercutiendo en gastos por parte del estado; por lo que no resulta extraño que las políticas, normas y ordenanzas apunten a construir edificaciones más sustentables y energéticamente más eficientes.

Si bien en Chile se ha avanzado un tanto en políticas energéticas destinadas a la vivienda, como lo es la implementación de la Reglamentación térmica de la *Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones* y la implementación de un sistema de calificación energética; estas se muestran disminuidas en materias orientadas a regular la hermeticidad al aire y a las cargas energéticas asociadas a las infiltraciones de aire. En parte, esto se produce por un desconocimiento y un bajo avance en entender el comportamiento de estas y su influencia directa en las pérdidas energéticas. Así, el acondicionamiento térmico asociado al flujo de aire en una edificación no se encuentra regulado y puede llegar a representar el 60% de la demanda energética de una vivienda (Citec UBB & Decon UC, 2010; Ossio, F. et al., 2012).

Para un mayor control de infiltraciones, y a futuro poder implementar una reglamentación térmica más completa, son necesarias metodologías que tengan un mayor alcance y menores limitaciones que el método de presurización del ventilador (Blower Door Test) estandarizado en la norma NCh3295.Of2013 y que es usualmente usado a nivel global.

Esto motiva el trabajo de título a desarrollar: usar una metodología de implementación más directa que permita analizar el comportamiento de las renovaciones de aire existentes en las viviendas que forman parte de la base de datos de la *Red Nacional de Monitoreo (ReNaM)*.

A partir de este trabajo, se espera analizar la aplicabilidad de la metodología escogida con respecto a la información y data que provee la ReNaM; además de dar un paso para futuros estudios que se pudiesen generar sobre la materia.

De esta manera, usando las ecuaciones que se presentan en la metodología se puede cuantificar la tasa de renovaciones de aire por hora característica de ciertas viviendas que forman parte de la ReNaM, según ciertas limitaciones.

Se espera que la metodología muestre resultados concisos, confiables y de baja variabilidad en el tiempo; de manera que se puedan caracterizar las infiltraciones de aire de una vivienda con ciertas propiedades, o al menos, identificar en qué condiciones la herramienta de cálculo podría ser válida.

En base a los resultados finales que se esperan obtener del trabajo, se podría tener un buen modelo de cálculo para cuantificar las renovaciones de aire y que será perfectamente aplicable en una vivienda promedio con tal de tener una serie de mediciones mínimas para calcular la concentración de vapor de agua en el aire a través del tiempo.

## 1.1 ALCANCE

El siguiente estudio de Trabajo de Título describe el comportamiento general de las renovaciones o infiltraciones de aire de una muestra de viviendas en Santiago, monitoreadas en la ReNaM, por medio de la metodología del gas trazador. El gas inerte utilizado para el cálculo de concentraciones, y posterior deducción de renovaciones de aire, corresponde al vapor de agua.

El estudio no compara la exactitud del método respecto a otros procedimientos ampliamente utilizados, como el método de presurización del ventilador o el modelamiento ambiental de viviendas, sino que se limita a describir el comportamiento que adoptan las infiltraciones bajo el procedimiento de cálculo descrito.

Las limitaciones de la metodología y supuestos que se acogen para el cálculo de renovaciones son descritas en los capítulos posteriores.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del trabajo es describir cuantitativamente las infiltraciones de aire asociadas a una serie de viviendas monitoreadas por ReNaM, mediante la metodología del gas trazador.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Entre otros objetivos relevantes se destacan:

- Indicar limitaciones de la metodología del gas trazador a utilizar y efectividad de cálculo bajo condiciones normales.
- Determinar comportamiento promedio a través del tiempo de las renovaciones de aire.
- Comparar la tasa de infiltraciones de aire bajo diferentes perspectivas o propiedades características de las viviendas que forman parte de ReNaM.
- Indicar si metodología de cálculo de infiltraciones es suficientemente confiable para aplicar en registros de ReNaM u otro Sistema de Monitoreo de Variables Ambientales (SMVA) e indicar qué variantes en la configuración del sistema de monitoreo se podrían implementar para mejorar la cuantificación de infiltraciones en la práctica.

### 1.3 SIMBOLOGÍA

- $D_v$  : Disipación de vapor de agua por unidad de tiempo.
- HA : Humedad absoluta.
- HR : Humedad relativa.
- P : Flujo de calor disipado.
- p : Presión de aire ejercida por efecto *stack* o efecto chimenea.
- Q : Flujo de calor transmitido en unidad de superficie.
- RAH : Renovaciones de aire por hora.
- $R_t$  : Resistencia térmica total del elemento constructivo.
- $U_t$  : Transmitancia total de elemento constructivo.
- $\Delta HA$  : Diferencia de humedad absoluta interna y externa en un mismo tiempo  $t$  de registro.
- $\Delta HA_{int}$  : Diferencia de humedad absoluta interna entre registros seguidos en condición de decaimiento.

## 2 TEMPERATURA Y HUMEDAD

Antes de entender el comportamiento de las renovaciones e infiltraciones de aire se hace necesario estudiar los factores que influyen la ocurrencia de estas en una mayor o menor medida. Los primeros conceptos que se hacen necesario entender son los referidos a calor, temperatura y humedad.

### 2.1 CALOR Y TEMPERATURA

El calor es la forma más elemental de la energía, puesto que es el residual que dejan las transformaciones de esta.

La temperatura de un cuerpo indica su nivel de energía calorífica con referencia a un nivel mínimo que sería el cero absoluto (ó 0 Kelvin), a partir del cual se desarrollan las escalas de temperatura. La escala habitual de grados Celsius toma como referencia los puntos de fusión (0°C) y ebullición (100°C) del agua.

La unidad usual para cuantificar calor es la Kilocaloría (*Kcal*), definida como la energía necesaria para aumentar 1°C en 1 kg de agua. Los cuerpos tienen la capacidad de acumular cierta cantidad de energía calorífica en su masa, en función de su temperatura y calor específico, propio de cada material. El calor específico se define como la cantidad de energía necesaria para aumentar 1°C en una masa de 1 kg del material.

El calor también interviene en los cambios de fase de la materia. En este caso, la energía puede permanecer latente hasta que se disipa en congelación o condensación; tal como se verá más adelante.

#### 2.1.1 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es el proceso mediante el cual la energía se propaga en distintos medios, o a través de distintitos cuerpos. Como el sistema que interactúa busca alcanzar el equilibrio térmico, este traspaso se genera siempre cuando exista una diferencia de temperatura entre los cuerpos, direccionado desde el campo con mayor temperatura hasta el otro con temperaturas más bajas.

Los mecanismos fundamentales de transferencia de calor son: conducción, radiación y convección.

##### 2.1.1.1 Conducción

Es la transmisión de calor desde una partícula de materia a otra por contacto directo, permaneciendo las partículas en posiciones relativas entre sí, tendiendo a igualar la temperatura entre los cuerpos que se encuentren en contacto. Este intercambio de energía cinética se produce por colisión molecular directa o por desplazamientos de electrones libres en los metales.

La conductividad térmica se define como la velocidad a la cual fluye el calor, por conducción, a través del material por unidad de área de la sección transversal, tomada normalmente a la dirección del flujo de calor y por unidad de gradiente de

temperatura, medido en la dirección del flujo de calor en una unidad de tiempo (Urra, 2013).

Luego, la conducción a través de los cerramientos es fundamental para permitir el control de temperatura ambiente interior.

### **2.1.1.2 Convección**

Método de transferencia de calor exclusivo de medios fluidos, donde el intercambio de calor se produce por el movimiento de las moléculas que componen la sustancia. La convección se produce debido a los gradientes de densidad creados por la temperatura en la masa del fluido. Los fluidos al calentarse aumentan su volumen y disminuye su densidad, por lo que asciende desplazando al fluido que se encuentra en la zona superior a menor temperatura.

En los fluidos también existe transferencia por conducción, pero en menor medida que por convección.

### **2.1.1.3 Radiación**

La radiación es un mecanismo físico de transmisión de calor de un cuerpo a otro que permite el intercambio de calor entre una fuente y su entorno, mediante la absorción y emisión de energía por ondas electromagnéticas. Por ende, en la radiación el calor se transmite a través del vacío, o atravesando un medio transparente; sin la exclusiva necesidad de un medio para desplazar la onda.

Cualquier material emite energía radiante en una cierta cantidad que depende de la temperatura y naturaleza de la materia. Al encontrar un material, la energía radiante puede ser absorbida en forma parcial y convertida en energía calorífica; puede ser parcialmente reflejada por este, o transmitida a través de él como en el caso de los medios transparentes.

Un caso térmico del mecanismo de radiación sobre las edificaciones es el *soleamiento*, término usado para referirse a la incidencia de la radiación solar sobre superficies exteriores de fachadas y cubiertas, el cual puede generar temperaturas muy elevadas y grandes flujos de calor entre el interior y exterior (Martín Monroy, 2010).

## **2.1.2 COMODIDAD TÉRMICA**

La sensación térmica de calor o frío es el resultado del balance entre el calor generado por el cuerpo humano y lo disipado por el ambiente, resultando en una sensación de comodidad cuando ambos se encuentran equilibrados.

La cantidad de calor disipado depende de factores personales, como actividad metabólica y arropamiento, y de las condiciones térmicas del espacio habitado, siendo las variables de mayor influencia la temperatura seca del aire, temperatura radiante, velocidad del aire y la humedad en el ambiente.

El cuerpo humano en circunstancias normales mantiene su temperatura entre los 36 y 37°C, intercambiando constantemente calor con el entorno. El metabolismo

compensa las pérdidas a través del consumo de alimentos. Luego, la sensación de satisfacción y comodidad depende de la velocidad con que se produzca el intercambio de calor. Si este es a una velocidad constante, existe una sensación de confort. En cambio, si el intercambio se produce a altas o bajas tasas de velocidad, se sentirá una sensación de frío o calor; respectivamente.

### *2.1.3 TEMPERATURA DEL AIRE*

La temperatura del aire seco o temperatura de bulbo seco se define como la temperatura de una masa de aire al momento de medir con un termómetro de mercurio seco. Es una de las principales variables que influye sobre la sensación térmica y, por ende, en el confort experimentado en los hogares.

El intercambio de energía con el cuerpo es producto de la convección, donde, dependiendo del gradiente térmico, cede o absorbe energía. Si la temperatura del aire es mayor, cederá calor al cuerpo, mientras que, si es menor, absorberá calor. Con esta información es insuficiente conocer la sensación térmica de las personas, por lo que se debe combinar con la temperatura de radiación, la velocidad del aire y la humedad para obtener la temperatura efectiva. Para condiciones estáticas se considera que se alcanza confort térmico para temperaturas de  $21 \pm 3^\circ \text{C}$  (Díaz Anguita, 2017).

### *2.1.4 DISIPACIÓN DE CALOR EN ENVOLVENTE TÉRMICA*

Ya entendidos los mecanismos de transferencia de calor, se explican los dos principales procesos bajo los cuales se generan pérdidas de energía a través de la envolvente de las edificaciones en general.

En primer lugar, se tienen las pérdidas por transmisión, determinadas por el diseño constructivo en general, conductividad térmica y espesor de los materiales constituyentes de la envolvente. El segundo tipo corresponde a las pérdidas por ventilación e infiltraciones de aire, influenciadas por las características permeables y herméticas de la envolvente del local (Ossio, De Herde, & Veas, 2012).

Los elementos de la envolvente que influyen en estas pérdidas son los muros perimetrales, ventanas, pisos, techos, aberturas de ventilación y las juntas entre distintos elementos perimetrales.

#### **2.1.4.1 Conducción y transmitancia**

El flujo de calor transmitido por unidad de superficie ( $Q$  en  $[\text{W}/\text{m}^2]$ ) depende de la diferencia de temperatura entre las superficies, del espesor del material ( $e$ ) y de la conductividad térmica del material ( $\lambda$  en  $[\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}]$ ). Luego, para capas homogéneas, el flujo se estima según la expresión siguiente:

$$Q = \Delta T \cdot \frac{\lambda}{e}$$

Para anexar las propiedades propias de la capa del material, se define *Resistencia térmica* como:

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

En tanto, la transmitancia térmica se define como la cantidad de calor que atraviesa, por unidad de tiempo, una unidad de superficie de un elemento constructivo. Es decir, es el inverso de la resistencia térmica de un material o solución compuesta por varios materiales.

De cierta manera, la transmitancia representa la facilidad con que la energía se transfiere a través de la capa de material desde un ambiente con mayor temperatura a uno de menor.

En el caso de un cerramiento con distintas capas de materiales, la transmitancia total se obtiene como:

$$U_t = \frac{1}{R_t}$$

$$R_t = R_{si} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{se}$$

Donde los parámetros  $R_{si}$  y  $R_{se}$  corresponden a la resistencia térmica superficial interior y exterior, respectivamente.

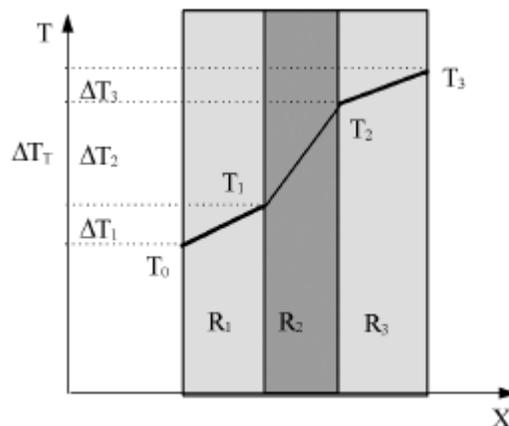


Figura 2-1: Variación de temperatura en cerramiento por mecanismo de conducción. Fuente: (Martín Monroy, 2010).

#### 2.1.4.2 Disipación por renovación e infiltraciones de aire

Cuando un flujo  $C$  de aire se introduce a una temperatura  $T_e$  distinta a la del aire al interior de la envolvente  $T_i$ , el aire expulsado disipa una cantidad  $P$  de calor, que es posible determinar bajo la siguiente expresión:

$$P = C \cdot D \cdot \gamma_a \cdot (T_e - T_i)$$

Siendo:

P: Flujo de calor disipado [Kcal/h]

C: Caudal [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

D: Densidad del aire, igual a  $1,225 \text{ [kg / m}^3\text{]}$  a presión normal y  $15^\circ\text{C}$

$\gamma_a$ : Calor específico del aire, igual a  $0,24 \text{ [kcal / kg }^\circ\text{C]}$

T: Temperatura seca del aire [ $^\circ\text{C}$ ]

Por lo tanto, la disipación de calor depende principalmente del gradiente de temperatura interna-externa y del caudal del flujo de aire.

Tomando el plano local, en Chile solo las pérdidas por transmisión se encuentran reglamentadas, no incluyendo en su reglamentación las pérdidas por infiltraciones y posibles ganancias a través de radiación sobre ventanas y el efecto invernadero que conlleva. Por lo tanto, no existe exigencia alguna para controlar las pérdidas derivadas de las infiltraciones de aire que, como se mencionó en un principio, pueden influir hasta en un 73% en la demanda energética por calefacción de una vivienda chilena (CITEC UBB, 2013).

## 2.2 HUMEDAD EN EL AIRE

El aire natural no viciado de nuestra atmósfera está compuesto por aire seco y una baja proporción de vapor de agua (no más del 2%), siendo el aire seco una mezcla de oxígeno y otros gases inertes.

Tabla 2-I: Composición del aire seco a nivel del mar. Fuente: ICARO, Manual del aire.

Volumen	Gas
78%	Nitrógeno
21%	Oxígeno
0,96%	Argón y otros gases
0,04%	Dióxido de carbono

La proporción de vapor de agua que puede contener el aire seco aumenta proporcionalmente a la temperatura, pudiendo ocupar todo el volumen a  $100^\circ\text{C}$

En las ciudades, esta composición se ve afectada por una reducción de oxígeno y aumento de dióxido de carbono proveniente de la combustión de hidrocarburos y quema de biocombustibles sólidos, además de otros gases provenientes de la actividad industrial. Además, el aire al interior de los locales y edificaciones

usualmente se encuentra más degradado, ya que al aire exterior se le son sumados otros contaminantes provenientes de la actividad metabólica y respiración de las personas más otros agentes externos.

La humedad o cantidad de vapor de agua en el aire es influenciada por la temperatura seca de este y viceversa. De esta manera, a la concentración de vapor de agua en el aire se denomina *humedad absoluta* ( $w$ ) y es medida en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco o por unidad de volumen.

El término *aire húmedo saturado* se refiere a la máxima proporción de vapor que puede admitir el aire seco a cierta temperatura, no admitiendo una mayor cantidad de vapor, aunque esté en contacto con agua líquida. La *humedad de saturación* ( $w_s$ ) depende exclusivamente de la temperatura seca, representándose esta y otras relaciones en el *Diagrama psicométrico*. Este diagrama permite representar y graficar todos los procesos químicos que se producen en el aire húmedo. Así, se representa la curva de saturación y combinaciones posibles de temperatura seca y humedad absoluta del aire húmedo.

Entre los parámetros que pueden ser estimados por el diagrama psicométrico se tiene:

- Temperatura seca del aire.
- Humedad absoluta.
- Humedad de saturación.
- Humedad relativa.
- Temperatura de punto de rocío.
- Entalpía (Cantidad de calor acumulado en una masa de aire).
- Temperatura húmeda.

## Psychrometric Chart

Barometric Pressure: 101.36 kPa  
© A.J.Marsh '99 www.squ1.com

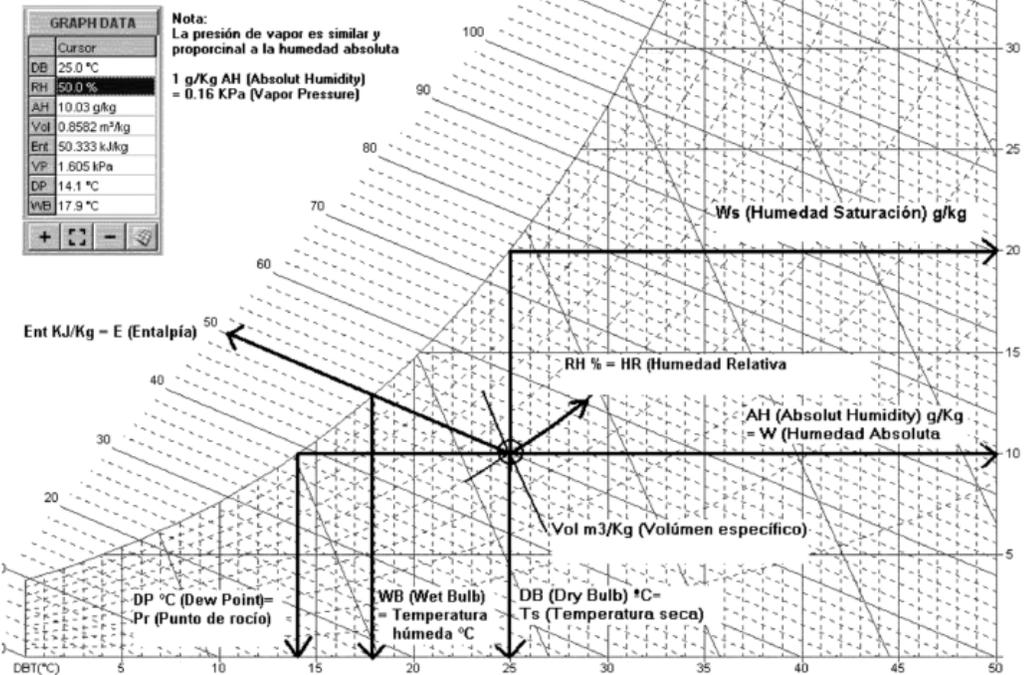


Figura 2-2: Carta psicométrica. Fuente: *PsychTool*.

También es posible determinar la *humedad relativa* en el aire, que es el porcentaje de humedad absoluta respecto a la humedad de saturación, a una misma temperatura.

$$HR = \left( \frac{W}{WS} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

Esta unidad permite una comprensión más directa de qué tan cerca está el aire de su punto de saturación y además provee de una percepción más simple de la sensación térmica aceptable para lograr un confort en el intercambio térmico entre el cuerpo humano y el ambiente. De esta manera, el rango aceptable de confort térmico de HR oscila entre el 30% y 70%.

En los edificios se puede condensar el vapor de agua del aire cuando este se enfría a una temperatura tal que su humedad absoluta coincida con la de saturación. Si dicho aire se sigue enfriando, condensará el vapor de agua que no es capaz de soportar en forma líquida, depositando el restante de humedad absoluta.

En tanto, la concentración de vapor de agua en un edificio depende de la humedad absoluta del aire exterior introducido y del aporte de fuentes interiores, por lo cual, **siempre habrá más humedad absoluta en el interior de los edificios**. Así, la humedad absoluta al interior es proporcional al caudal de emisión de las fuentes interiores y humedad absoluta exterior e inversamente proporcional al caudal de renovación.

### 2.2.1 PERMEABILIDAD DE LOS MATERIALES

La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un fluido que lo atraviese sin cambiar su estructura interna. Es una propiedad variable según la temperatura ambiental del sector, aumentando según esta. A pesar de que existen diferencias de órdenes de magnitud al comparar la permeabilidad entre materiales, hasta el film más impermeable tiene una permeabilidad cuantificable.

La tasa a la cual se transmite el vapor de agua en un material de cierta permeabilidad depende del gradiente de presión. Si el elemento está seco en un ambiente húmedo absorberá humedad, por otro lado, si el elemento está mojado en un ambiente seco perderá humedad, y si la humedad relativa es igual a la del ambiente, no existirá transmisión de vapor (Cancino, 2016).

Otro concepto para tener en cuenta es la *absorción higroscópica* que es la tendencia a atraer, absorber y retener humedad del aire; normalmente relacionada a materiales con propiedades hidrofílicas.

### 2.2.2 CONDENSACIÓN

En las viviendas, la condensación se produce en muros y superficies cuando una capa de aire húmedo cede calor hacia estas superficies para luego cambiar de estado. Los factores que influyen en la condensación se relacionan a una baja temperatura del aire al exterior de la envolvente, bajas resistencias térmicas de los elementos de la envolvente y una elevada humedad relativa y baja temperatura al interior de la envolvente.

Las condensaciones que se producen en los muros son las siguientes:

- Condensación intersticial: se produce al interior de la masa del elemento. El aire contenido al interior es condensado al saturarse.
- Condensación superficial: se produce en la superficie del elemento cuando la temperatura de este es inferior a la temperatura límite asociada a la humedad de saturación del vapor de agua.

Producto de estas condensaciones se tienen distintas consecuencias negativas como la formación de ambientes propicios para la proliferación de microorganismos, los cuales podrían afectar la respiración humana, producir olores desagradables y conllevar a problemas de salubridad; disminución considerable del calor dentro de la vivienda y depreciación del inmueble por deterioros o mantenciones de alto costo sobre los elementos afectados por condensación.

### 2.2.3 VAPOR DE AGUA COMO CONTAMINANTE

Aunque el vapor de agua como gas no afecta a la salud humana, la existencia de fuentes de vapor procedentes de la evaporación, actividad metabólica o la combustión puede aumentar su concentración hasta niveles de humedad relativa próximos a la saturación, con riesgo de condensaciones, humedades, proliferación de organismos patógenos y otras patologías constructivas (Martín Monroy, 2006).

Cabe destacar que una vivienda promedio puede evaporar unos 7 litros de agua al día, siendo las renovaciones de aire el único mecanismo para evacuar toda el agua evaporada al interior de estas (Martín Monroy, 2010).

#### 2.2.4 DISIPACIÓN DE VAPOR DE AGUA POR RENOVACIONES DE AIRE

Tal cual como se disipa el calor bajo el efecto de infiltraciones y renovaciones de aire, la concentración de vapor de agua es disipada cuando se introduce un caudal ( $C$ ) de aire como una humedad absoluta ( $W_e$ ) distinta a la del aire interior ( $W_i$ ) de la envolvente. La disipación de vapor ( $D_v$ , en [g/hora]) se puede determinar según la siguiente ecuación:

$$D_v = C \cdot D \cdot (W_e - W_i)$$

Siendo:

$D_v$ : Cantidad de vapor disipado [g/h]

$C$ : Caudal [m<sup>3</sup>/h]

$D$ : Densidad del aire, igual a 1,225 [kg/m<sup>3</sup>] a presión normal y 15°C

$W$ : Humedad Absoluta del aire [g/kg]

## 3 CALIDAD DEL AIRE E INFILTRACIONES

### 3.1 CARACTERÍSTICAS DE VENTILACIÓN E INFILTRACIONES

A continuación, se explican brevemente los conceptos de renovaciones e infiltraciones de aire.

La ventilación de aire o caudal de renovación de aire se define como el intercambio de aire *usado* o *viciado* del interior de los edificios por aire *nuevo* o *fresco* procedente del exterior, bajo condiciones controladas a través de un diseño para este fin. Con esto se espera que la calidad del aire interior alcance un nivel aceptable para prevenir enfermedades sobre las personas, patologías en las edificaciones y proveer de un ambiente más grato para desarrollar las actividades laborales o cotidianas del día a día. Por otro lado, se espera que este intercambio de aire no sea excesivo para prevenir las pérdidas de calor que conlleva mantener un flujo de aire.

Por otro lado, las infiltraciones de aire hacen referencia a renovaciones no controladas de aire externo que inciden por la envolvente de un local, la cual genera pérdidas energéticas por acondicionamiento térmico adicionales a las esperadas. A pesar de que también aportan a las necesidades por ventilación, se diferencian de estas dado que se producen por fisuras o aberturas no previstas de la envolvente, como grietas y juntas de unión no selladas en elementos perimetrales (CITEC UBB, 2013).

Las infiltraciones se producen por la existencia de diferencias de presiones a través de las aberturas. Estas pueden ser producidas por la acción del viento, diferencia de temperatura entre interior y exterior, donde influyen el tamaño y forma de la grieta; o por la operación de aparatos de ventilación mecánica (Ventilación activa).

De esta manera, las infiltraciones de aire pueden influir negativamente sobre el confort ambiental al interior de un local o vivienda y actúan en desmedro del desempeño energético, aumentando gastos por calefacción en meses fríos y de refrigeración en periodos calurosos.

Basados en estudios en Canadá y Estados Unidos, la American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, ASHRAE, indica que la contribución que se le atribuye a los diferentes elementos constructivos en la ocurrencia de infiltraciones de aire son: 35% a los muros, 18% a los cielos y 15% a las ventanas. También, ASHRAE indica que un 30% de las infiltraciones se producen por los equipos de climatización y chimeneas. En Chile, los sistemas constructivos de viviendas son diferentes y no es común contar con sistemas de ventilación o aire acondicionado. Por ende, los porcentajes anteriores pueden diferir significativamente de los indicados por ASHRAE. Por ejemplo, en el país es esperable que, en viviendas de muros de albañilería u hormigón, las infiltraciones se produzcan mayoritariamente por puertas y ventanas, y además por la techumbre en el caso de las casas. Asimismo, en construcciones de muros livianos (estructura de madera o perfiles livianos de acero), la permeabilidad de los muros pueden contribuir de manera importante a las infiltraciones (Madrid, Opazo, & Parada, 2012).

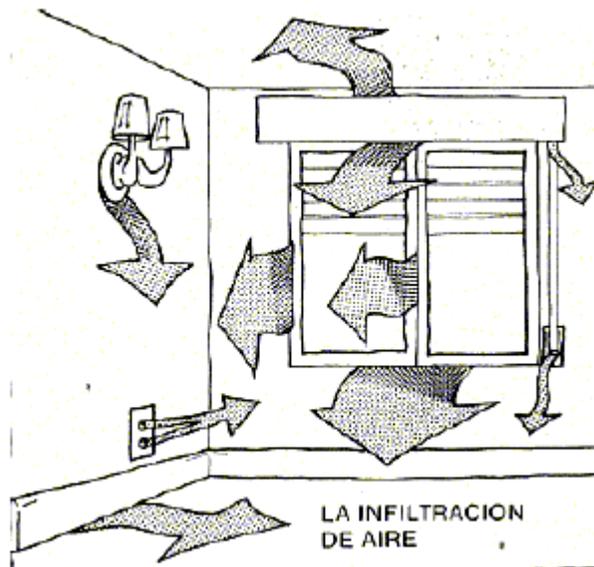


Figura 3-1: Posibles puntos de infiltración de aire en una habitación.

Tanto las ventilaciones de aire como la tasa de infiltración es posible medirlas según distintas combinaciones de unidades que mezclen volumen con unidad de tiempo. Dentro de las más usadas se encuentran las siguientes:

- $\frac{m^3}{h}$  y  $m^3$  de volumen de local o renovaciones/hora (1/h ó ACH, en inglés).
- $\frac{m^3}{h}$  y  $m^2$  de superficie de local.
- $\frac{l}{s}$  y  $m^2$  de superficie de local.
- $\frac{m^3}{h}$  y número de personas.

La primera unidad, tasa de renovaciones por hora, es la más utilizada dentro de códigos internacionales. Esta se relaciona con el volumen interior del inmueble y corresponde a la cantidad de veces que se renueva el aire interior, considerando aportes de ventilación e infiltraciones (Ossio et al., 2012).

La tasa de renovaciones de aire necesaria para mantener la higiene y evitar patologías en los espacios de uso, dependerá de la función del local propio. Para una vivienda habitacional se tienen las siguientes renovaciones por hora recomendadas:

Tabla 3-1: Renovaciones de aire por hora sugeridas para diferentes espacios tomando como unidad ACH50. Fuente: (Cooperación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción, 2008).

Lugar	n
Dormitorio	0,5 – 1
Living	3 – 5
Comedor	3 – 5
Cocina	5 – 10
Baño	5 – 15

## 3.2 VIENTOS Y SU INFLUENCIA

La influencia del movimiento del aire en la sensación térmica se debe a las diferencias en la cantidad de calor intercambiada por convección y al aumento en la eficiencia de la evaporación del sudor. En lugares calurosos, un aumento en su velocidad será beneficioso para alcanzar el confort térmico, producto de una disminución en la sensación de la temperatura ambiental (Díaz Anguita, 2017); en caso contrario, el viento tiende a jugar en contra del confort térmico.

Además de afectar significativamente en el confort y sensación térmica que experimenta nuestro cuerpo, el viento juega un rol principal para el cálculo de renovaciones de aire al influir directamente el diferencial de presiones entre la envolvente y el exterior.

La ventilación y renovación de los edificios por medios pasivos controlados o no controlados depende en una gran medida de la dirección y velocidad del viento, cuya incidencia sobre la envolvente del edificio puede generar presiones diferenciales por efectos aerodinámicos, generando un caudal de renovación (Martín Monroy, 2006). Es por esto que se hace necesario comprender el comportamiento de los vientos en las zonas de análisis del estudio.

Los estudios estadísticos de velocidad y dirección de los vientos son complejos, ya que presentan importantes variaciones en periodos que van desde horas, días, meses o años. Sin embargo, se tienen ciertas referencias de velocidad y direccionalidad de estos, principalmente entregados por la data de las estaciones meteorológicas, aeropuertos, estaciones de monitoreo del aire, etc.

Además, se debe considerar que el viento incidente sobre las viviendas y edificios se ve constantemente afectado por la topografía urbana del entorno, donde es de importancia destacar los volúmenes de edificación en las proximidades.

### 3.2.1 PRESIÓN DINÁMICA DE VIENTO

Como bien se menciona en la norma NCh432 (NCh432.Of71 Ministerio de Obras Públicas, 1971), la velocidad del viento  $v$  produce una presión dinámica base según la expresión:

$$w = \frac{v^2}{16} \left[ \frac{kg}{m^2} \right] \quad (2)$$

Esta presión básica es ponderada por un coeficiente eólico  $C$ , que depende de la orientación y geometría de la construcción respecto a la dirección del viento.

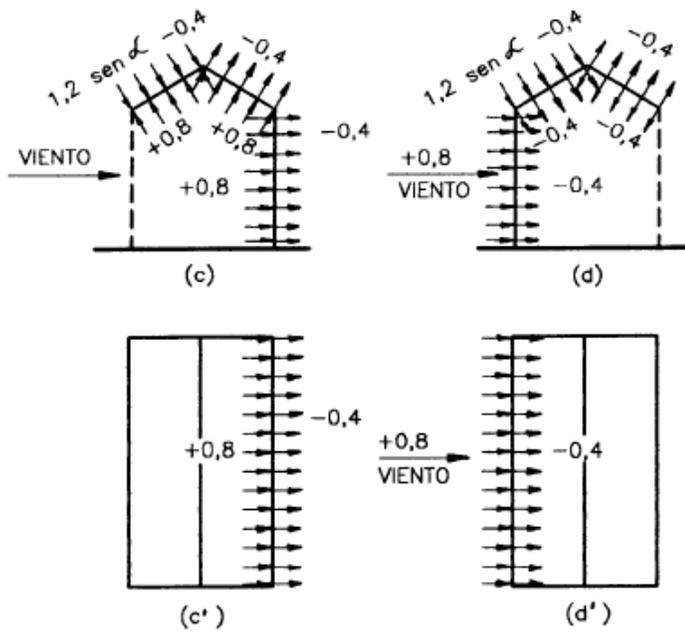


Figura 3-2: Ejemplo de coeficientes eólicos. Fuente: NCh432.Of71.

### 3.2.2 DIRECCIÓN DE LOS VIENTOS

En las estaciones meteorológicas la dirección y velocidad del viento se suele medir con una veleta y anemómetro, respectivamente. La veleta mide la dirección del viento en grados sexagesimales que posteriormente son representados en coordenadas cardinales.



Figura 3-3: Veleta y anemómetro.

Para no verse afectados por los obstáculos y *rugosidad* del suelo, tanto la veleta como anemómetro se suelen instalar a una altura de 10 metros desde el nivel de superficie.

En Chile, el viento se desplaza principalmente con una dirección Sur (S), Suroeste (SW) y Oeste (W); la cual varía dependiendo de la zona geográfica y efectos topográficos naturales.

A continuación, se destacan las principales direcciones de viento en ciertas ciudades de Chile; las cuales, como se verá más adelante, son monitoreadas en la ReNaM.<sup>1</sup>

**Tabla 3-II: Dirección predominante de viento durante año 2017 en ciudades ReNaM.**

<b>Ciudad</b>	<b>Estación meteorológica</b>	<b>Dirección predominante de vientos según meses del año</b>
Antofagasta	Cerro Moreno	Sur (S): Todo el año
Valparaíso	Rodelillo	Sur (S): Ene, Mar, Abr, Ago, Sep, Oct, Nov Noroeste (NW): Feb, Dic Norte (N): May, Jun Sureste (SE): Jul
Santiago	Quinta Normal	Variable Sur (S) y Suroeste (SW): Todo el año
Temuco	Maquehue	Suroeste (SW): Ene, Sep Oeste (W): Feb, Mar, Oct, Nov, Dic Noreste (NE): Abr, May, Jun, Jul, Ago
Coyhaique	Teniente Vidal	Oeste (W): Ene, Feb, Sep, Nov, Dic Norte (N): Mar, Abr, Ago Noreste (NE): May, Jun, Oct

### 3.2.3 VELOCIDAD DE VIENTOS

El anemómetro mide la fuerza o velocidad del viento en nudos (KT) o km/hr, normalmente en intervalos medios de 10 minutos. Su funcionamiento se basa en tres cazoletas unidas a un brazo cada una, las cuales a su vez están unidas a un eje vertical interior donde se miden las revoluciones por segundo que son registradas electrónicamente. Existen otros tipos de anemómetros que incluyen ultrasonido o hilo electrocalentado, pero son usados en zonas donde las condiciones meteorológicas son más adversas.

<sup>1</sup> Las direcciones principales de viento son obtenidas a partir de los productos climatológicos del año 2017 respecto a cada ciudad. Fuente: [www.meteochile.cl](http://www.meteochile.cl)

Tal como se mostró en las mediciones de dirección, se indican las velocidades promedio de viento por ciudades de referencia:

Tabla 3-III: Velocidad media anual de viento por ciudad. Fuente: Tabla 3.3 (CITEC UBB, 2013).

Ciudad	Velocidad del viento [m/s]
Antofagasta	5,1
Valparaíso	6,2
Santiago	3,6
Temuco	3,0
Coyhaique	5,1

### 3.2.4 VIENTO EN ENTORNO URBANO

Las estaciones meteorológicas miden las variables del viento bajo condiciones estandarizadas, mediante torretas de 10 metros de altura en zonas despejadas. Sin embargo, la velocidad del viento a campo abierto aumenta en función de la altura y se reduce en las proximidades del suelo bajo el factor de *rugosidad* de la superficie.

Las edificaciones y su posición relativa en el entorno urbano se transforman en obstáculos eólicos que pueden producir importantes reducciones de la velocidad, modificar la dirección del flujo de aire, e incluso crear áreas de notable incremento en la velocidad de la ráfaga.

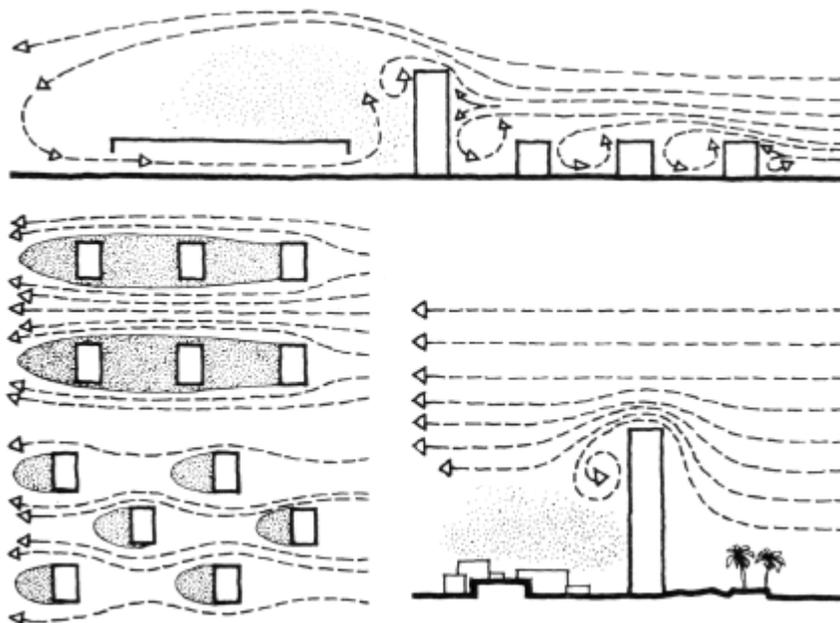


Figura 3-4: Ejemplos de fenómenos aerodinámicos que generan las edificaciones. Fuente: (ICARO, Manual del Aire).

Finalmente, con el fin de favorecer la ventilación y renovación del aire, sería ideal conocer la real influencia del viento en entornos urbanos y realizar estudios específicos según el emplazamiento. Sin embargo, es extremadamente difícil conocer

a precisión cómo interactúa el viento frente a la envolvente sin tener la instrumentación necesaria a nivel local de la edificación.

### 3.3 TEMPERATURA Y SU INFLUENCIA

Conocido como el efecto *stack* o efecto chimenea, la temperatura es inversamente proporcional a la densidad del aire, por lo que menor es el peso que ejerce la columna de aire sobre la grieta. En el caso de que existan grietas o aberturas inferiores y superiores, el aire interior tenderá a ascender cuando la temperatura interior del recinto es mayor que la del aire exterior. La presión ejercida **p** se puede calcular según la siguiente ecuación:

$$p = 353 \cdot \Delta h \cdot \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_e} \right) \left[ \frac{kg}{m^2} \right] \quad (3)$$

Donde  $T_i$  y  $T_e$  es la temperatura interior y exterior, respectivamente; medida en *Kelvin*.

De esta forma, en condiciones de invierno el aire exterior suele estar más frío que la temperatura interior de las viviendas, lo cual hace suponer un efecto *stack* constante que tienda a incrementar con la altitud de la zona y la altura del edificio.

En zonas donde la velocidad media del viento es mayor a 3 [m/s], usualmente prevalece el efecto de las presiones de viento sobre el efecto del diferencial de temperaturas.

## 4 BASE DE DATOS E INSTRUMENTACIÓN

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DE RENAM

La Red Nacional de Monitoreo (ReNaM) es una iniciativa del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), para generar una base de datos de información sobre el comportamiento ambiental de las viviendas en Chile, con el objetivo de mejorar los estándares futuros de calidad de las viviendas según la realidad habitacional del país.

Este proyecto consiste en instalar módulos *Netatmo Weather Station* al interior de determinadas viviendas del país. De esta manera, es posible medir, en tiempo real; la temperatura, humedad, ruido y calidad del aire, al interior de las viviendas, con el objetivo de evaluar el desempeño de las construcciones durante su operación (MINVU, Julio, 2017. Recuperado de [www.renam.cl](http://www.renam.cl)).

La información ambiental obtenida de las viviendas monitoreadas se puede ver en línea y de forma pública. Además, quienes la habitan encuentran consejos para mejorar las condiciones de habitabilidad.

#### 4.1.1 VISIÓN DE RENAM

- *Visión 1: Personas*  
*Serán capaces de aumentar su bienestar y optimizar el consumo de recursos naturales, mediante acciones producidas a partir de información obtenida por ReNaM.*
- *Visión 2: El estado y otros actores*  
*Podrán mejorar la habitabilidad de las personas, considerando las conductas de operación de uso de las edificaciones, medidas a partir de sensores instalados en las viviendas.*  
ReNaM ofrece una gran muestra de indicadores que exponen las condiciones ambientales interiores en las que se encuentran las viviendas nacionales. De esta manera, la base de datos puede ayudar a definir y proyectar políticas públicas para mejorar la calidad y habitabilidad de las edificaciones en Chile.
- *Visión 3: Ciudades*  
*Aquellas que cuenten con tecnología podrán impulsar iniciativas de emprendimiento e innovación en torno a mejorar la calidad de vida de sus habitantes.*

Adicionalmente, ReNaM ofrece una gran base de datos que puede ser usada para estudios académicos sobre distintas aristas de la eficiencia energética en edificaciones.

#### 4.1.2 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de ReNaM es generar y disponer de una base de información pública, útil y permanente, al tiempo que apoye la toma de decisiones del Estado y de los actores interesados en torno a mejorar la calidad de vida de las personas que

habitan las edificaciones del país, y prestar el apoyo necesario para impulsar las distintas tecnologías y servicios en torno a las ciudades inteligentes.

#### 4.1.3 HOJA DE RUTA

Durante los años 2014 y 2015 se desarrolló el estudio de factibilidad de la iniciativa. Aprobado este, el año 2015 se desarrolla el plan piloto de la plataforma.

El alcance, en el largo plazo, es lograr que un porcentaje considerable de viviendas nuevas incorporen sensores de monitoreo al año 2020. En la siguiente figura se presenta la hoja de ruta del proyecto, sus períodos, fases y alcances:



Figura 4-1: Hoja de ruta de ReNaM. Fuente: ([www.renam.cl](http://www.renam.cl)).

#### 4.1.4 FUNCIONAMIENTO DE RENAM

Desde su inicio hasta finales del año 2017, ReNaM era implementada, operada y mantenida por la *Fundación Chile* que, en su rol de fomentar innovaciones y el desarrollo sustentable del país, busca que ReNaM sea una herramienta que disponga de información útil para las personas y habiliten nuevos emprendimientos y desarrollos tecnológicos en torno a la sustentabilidad.

Actualmente, la red cuenta con sensores en alrededor de 300 viviendas del país tanto particulares como viviendas sociales. Estas se encuentran principalmente repartidas en las ciudades de Santiago, Antofagasta, Viña del Mar, Valparaíso, Coyhaique y otros poblados menores como San Antonio, Maitencillo, Placilla y otros alrededores de la Región Metropolitana.

Cada vivienda cuenta con equipos que permite medir las siguientes variables:

- Temperatura interior y exterior en grados Celsius.
- Humedad Relativa interior y exterior.
- Incidencia de ruido interior en decibeles [dB].
- Calidad del aire – Concentración de CO2 interior en PPM.

La base tecnológica corresponde a los Sistemas de Monitoreo de Variables Ambientales (SMVA), que es el sistema de procesamiento y transmisión a la plataforma global. En normal funcionamiento, cada monitor debiese procesar y levantar los datos hacia la plataforma en periodos de 30 minutos.

A continuación, se muestra un esquema básico de un SMVA:

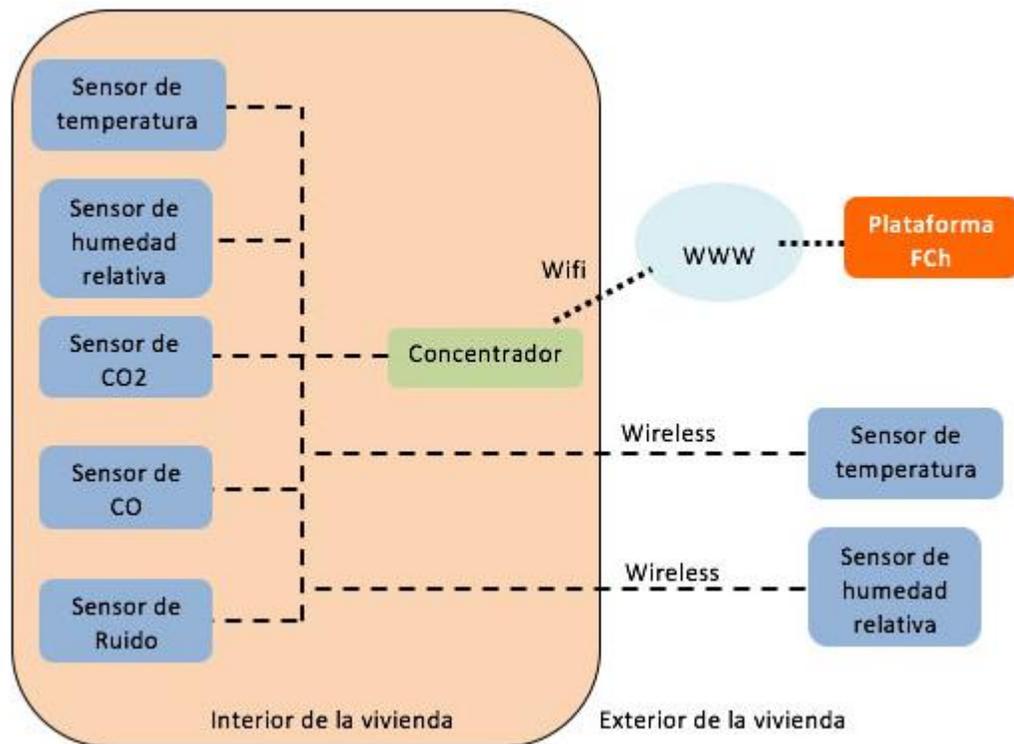


Figura 4-2: Esquema de SMVA. Fuente: ([www.renam.cl](http://www.renam.cl)).

Por lo tanto, la base de datos ReNaM provee de una gran gama de datos reales representativos de las viviendas del país y da las entradas suficientes para calcular infiltraciones de aire según la metodología de cálculo de infiltraciones explicada más adelante.

## 4.2 NETATMO WEATHER STATION

*Netatmo Weather Station* es una estación meteorológica personal fabricada por la compañía francesa *Netatmo*.

El sistema meteorológico consiste en una serie de sensores (uno externo y hasta tres módulos internos más un pluviómetro y anemómetro adicionales) enlazados por una intrared WiFi. De esta manera, la estación personal permite recopilar datos del entorno exterior e interior en tiempo real.

El sensor externo puede medir temperatura, humedad relativa y presión barométrica, además de una predicción en tiempo real de las condiciones climáticas.

En tanto, el módulo interior mide los mismos campos que el externo más la concentración de Dióxido de Carbono en el aire y cuenta con un sonómetro integrado. Adicionalmente, la Estación Meteorológica Netatmo emite alertas para ventilar el espacio según los siguientes rangos de concentración de dióxido de carbono:

Tabla 4-I: Alertas de ventilación Netatmo Weather Station.

Estado del aire	Concentración de CO <sub>2</sub> [ppm]
Muy Bueno	<425
Bueno	425 – 1180
Medio	1180 – 2250
Alerta	>2250

Cabe destacar que los datos recolectados por la estación pueden ser seguidos en tiempo real para observar ciclos y obtener variables meteorológicas locales (“Netatmo Smart Home Weather Station,” n.d.).

Las viviendas monitoreadas en ReNaM cuentan con un módulo Netatmo interno y otro externo. El módulo interno es localizado en zonas donde no se vean interferidas las variables a medir por agentes puntuales, por lo que se debe evitar ubicarlos en cocinas, baños, lavaderos, etc.

En el caso del módulo externo, se debe evitar instalar este en zonas donde constantemente se vea expuesto a luz solar directa. El efecto de soleamiento puede provocar que las mediciones de temperatura se vean alteradas y no sean representativas respecto a la temperatura ambiente.

Las especificaciones de los módulos meteorológicos se adjuntan en Anexo 1: Especificaciones de Módulo Netatmo.

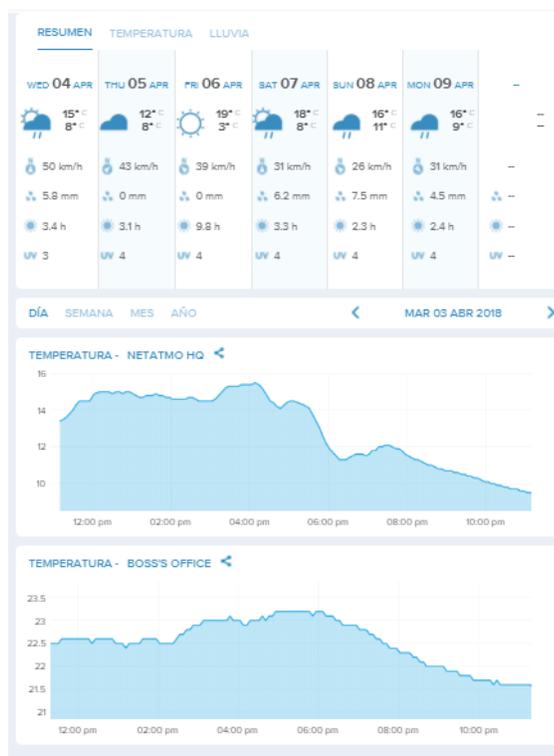
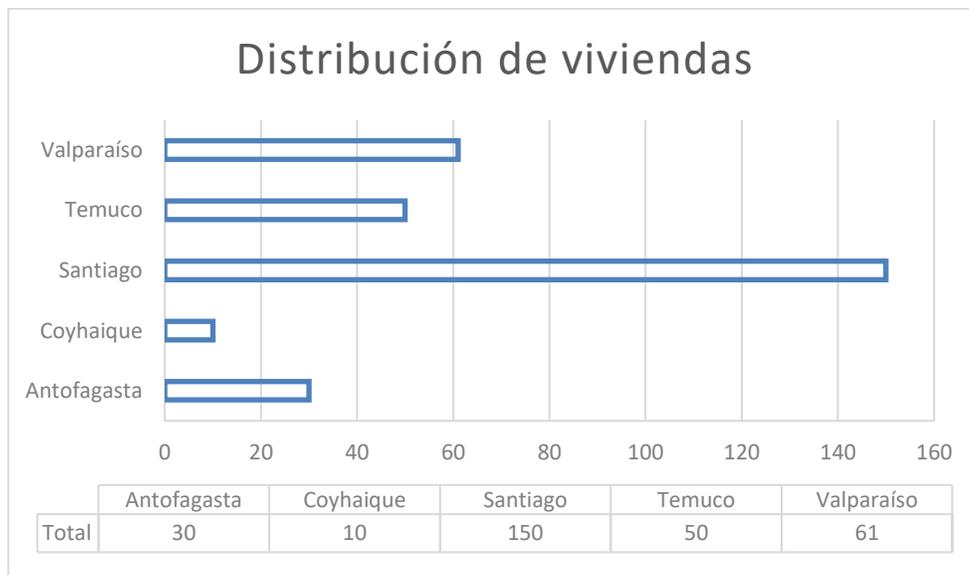


Figura 4-3: Interfaz para teléfonos móviles de Netatmo. Fuente: (www.netatmo.com).

### 4.3 VIVIENDAS Y CARACTERÍSTICAS

La muestra total descargada para el estudio está compuesta por 301 viviendas distribuidas en las siguientes ciudades:

- Santiago
- Antofagasta
- Valparaíso y Viña del Mar
- Temuco
- Coyhaique



**Figura 4-4: Distribución de viviendas por ciudades.**

Cada vivienda de la base de datos es asignada a un código numérico único con formato "NAXXX" (Por ejemplo, NA005, NA101, NA300, etc.)

Se debe tener en consideración que la red no ha funcionado de manera estable desde su implementación, existiendo viviendas en que, en determinados rangos de tiempo, no han subido datos al SMVA. Estas discontinuidades se deben a diferentes razones, como falta de una señal Wifi estable, desperfectos en el equipo, etc.

En términos de periodo, las mediciones que ofrecen una mejor continuidad de datos son las perpetuadas durante el año 2017 en adelante, periodo en que la ReNaM es sostenida por una plataforma más sólida y se tiene conocimiento de ciertos errores generales.

En tanto, entre las ciudades que presentan una mejor calidad de mediciones, se encuentra Santiago y Coyhaique.

#### *4.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS CIUDADES*

A continuación, se presenta una breve reseña de las características climáticas de las ciudades de la muestra principal, dando énfasis a la ciudad de Santiago, de la cual se obtiene la muestra final utilizada para el análisis.

##### **4.3.1.1 Antofagasta**

Ciudad ubicada en la costa de su región homónima en el norte de Chile.

Si bien la ciudad presenta diversos microclimas según sus sectores geográficos, presenta un clima general bastante cálido, con temperaturas medias en el rango de 14 y 20°C durante el año.

A lo largo del año, presenta humedades relativas medias comprendidas entre el 75 y 80%.

##### **4.3.1.2 Valparaíso**

Ciudad portuaria de la zona centro de Chile.

Presenta un clima mediterráneo fresco y sus temperaturas medias oscilan entre los 11 y 17° C durante el año. En tanto, su humedad relativa media fluctúa entre el 67% y 85%.

##### **4.3.1.3 Santiago**

Capital de Chile ubicada en la zona central interior del país. Presenta un clima templado bastante seco, con lluvias invernales y una amplia variación térmica entre las estaciones de invierno y verano, pasando de temperaturas medias de 8°C en los meses de junio y julio a 20°C en el mes de enero.

En tanto, la humedad relativa también presenta una gran variabilidad estacional, bordeando un 60% en los meses cálidos y llegando a una media de 85% en los meses más fríos.

A continuación, se grafican los promedios mensuales de humedad relativa y temperatura mínima, media y máxima en los meses de mayo, junio, julio y agosto; correspondientes al periodo de invierno y durante los cuales se desarrolla el análisis de infiltraciones de aire. Los datos son obtenidos de las tres principales estaciones meteorológicas de la ciudad, correspondientes a las estaciones Quinta Normal, Tobalaba y Pudahuel.

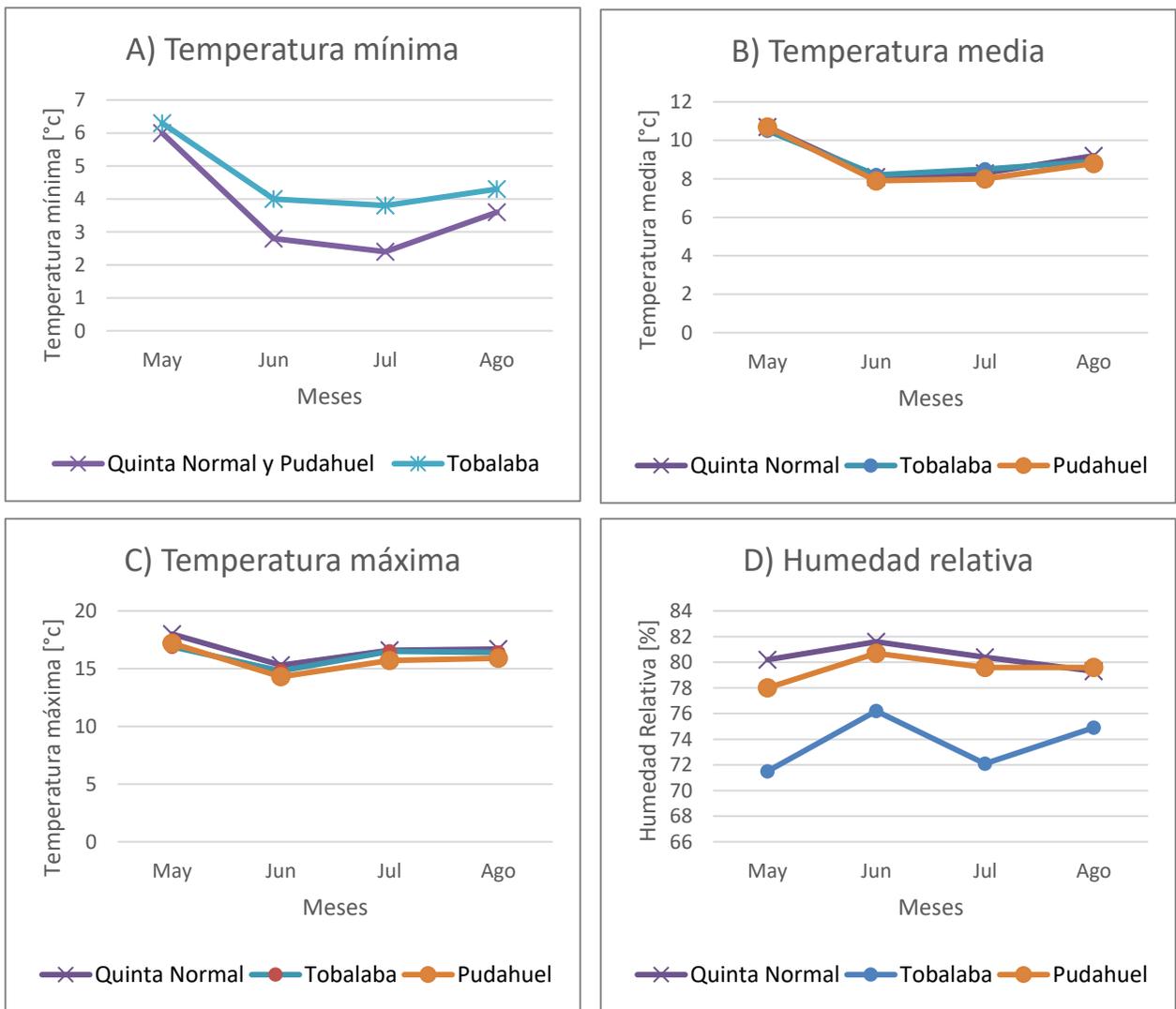


Figura 4-5: Promedios mensuales de Humedad Relativa y variables térmicas en la ciudad de Santiago según tres estaciones principales. Año 2017. Datos obtenidos de Dirección Meteorológica de Chile.

#### 4.3.1.4 Temuco

Ciudad interior del sur de Chile ubicada en la región de La Araucanía. Se caracteriza por un clima templado lluvioso de bajas temperaturas. La temperatura media anual es de 12° C aproximadamente y presenta humedades relativas que oscilan entre el 70% y 88%.

#### 4.3.1.5 Coyhaique

Ciudad interior ubicada en la zona austral de Chile, perteneciente a la región de Aysén del General Carlos Ibañez del Campo. La media mensual en el mes de julio es menor a 9°C mientras que la media mensual más alta es de 17°C.

La humedad relativa fluctúa entre el 48% en los meses más secos de verano y llegando a casi el 90% en los meses de invierno.

Los vientos predominantes provienen desde el sur con velocidades medias de 11 km/h.

## 5 METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE INFILTRACIONES

Como gran parte de las infiltraciones actúan por aberturas no intencionales sobre la envolvente, no es factible medir directamente el caudal de aire a través de los minúsculos agujeros y grietas desconocidas que existen en una vivienda en general. Es por esto que se utilizan métodos indirectos de medición para conocer el nivel de hermeticidad de un local. A continuación, se explican dos métodos: la técnica de presurización mediante el ventilador, el cual es ampliamente usado internacionalmente bajo sus distintos estándares, y la técnica del gas trazador que, para efectos de este documento, es la metodología utilizada para cuantificar las infiltraciones de aire en las viviendas.

### 5.1 METODOLOGÍA ESTÁNDAR – *BLOWER DOOR TEST*

La prueba de presurización se utiliza para medir la hermeticidad de los edificios y/o sus componentes. El propósito de este método consiste en medir la hermeticidad de un edificio a presiones superiores a las que se desarrollan naturalmente, pero no tan grandes para que el proceso de presurización genere y/o distorsione artificialmente las aberturas (Ossio et al., 2012).

El ensayo consiste en instalar un ventilador de gran capacidad en alguna de las puertas de la vivienda para luego presurizar y despresurizar el interior del espacio a evaluar. De esta manera, el aire se filtrará hacia el exterior e interior, respectivamente (Madrid et al., 2012). Se mide el flujo necesario para producir diferentes intervalos de diferencia de presión según la presión de referencia escogida.



Figura 5-1: Equipo ventilador para realizar un Blower Door Test.

El principio básico es que en viviendas más selladas se requiere un menor flujo de aire para producir la diferencia de presión de base, mientras que en aquellas que presentan mayores tasas de infiltración se requiere un mayor volumen de aire para producir la misma diferencia.

Los valores típicos de diferencia de presión, a los cuales se reportan los resultados del ensayo, son a 50 Pa y 4 Pa.

Desafortunadamente un flujo determinado a 50 Pa no representa una cantidad de interés, si se quieren comprender los flujos que atraviesan la envolvente en condiciones normales de uso, dado que las presiones a las que son sometidas las viviendas son más cercanas a intervalos entre 1 Pa y 4 Pa. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la elección más precisa de 50 Pa (errores de  $\pm 15\%$ ) es menos real, mientras que la presión más real de 4 Pa es menos precisa (errores de  $\pm 50\%$ ).

Para minimizar el efecto de las presiones naturales, la prueba debe llevarse a cabo durante períodos de baja o idealmente nula velocidad de viento.

## 5.2 METODOLOGÍA DEL GAS TRAZADOR

Este método de prueba cubre técnicas usando un gas trazador diluido de forma uniforme para determinar el intercambio de aire con el exterior en una zona singular. Para esto se utilizan características referentes a la composición del aire y se analiza la variación de concentración del gas trazador en función del tiempo para obtener la tasa de ventilación y, por ende, como responden al mismo principio, las infiltraciones de aire. (International, 2011)

Mediante el registro de la concentración del gas trazador en función del tiempo y aplicando los principios de balance de masa, es posible relacionar la tasa de renovación en espacios singulares. Sin embargo, el método conlleva a grandes errores cuando los ensayos son muy postergados en el tiempo, ya que no se tiene un control estricto de las condiciones externas a la envolvente.

La Tabla 5-I describe algunos de los gases trazadores usualmente utilizados.

**Tabla 5-I: Gases trazadores y seguridad. Fuente: ASTM E741-11.**

<b>Gas</b>	<b>Toxicología</b>	<b>Reactividad química</b>	<b>Comentarios</b>
Hidrógeno	No tóxico	Altamente reactivo en presencia de calor, fuego o CO <sub>2</sub>	Peligro de fuego y explosión cuando está expuesto a calor, llama o CO <sub>2</sub>
Vapor de agua	No tóxico	Inerte	Constituyente del aire
Helio	No tóxico	Inerte	
Monóxido de carbono	Se combina con hemoglobina para causar anoxemia	Altamente reactivo con O <sub>2</sub>	Peligro de fuego y explosión cuando está expuesto a calor o llama

<b>Gas</b>	<b>Toxicología</b>	<b>Reactividad química</b>	<b>Comentarios</b>
Dióxido de carbono	Irritante de ojos	Reacciona vigorosamente con algunos metales y es soluble en agua	
Óxido de nitrógeno	Moderadamente tóxico por inhalación	Reacción violenta con aluminio, soluble en agua	Puede formar mezcla explosiva con aire, se enciende a altas temperaturas
Etano	No tóxico	Inflamable	Incompatible con cloro y oxidante de materiales
Metano	No tóxico	Inflamable	Incompatible con halógenos y oxidante de materiales

En teoría, cualquier gas inerte puede utilizarse como trazador, pero como se ve la tabla anterior; existen ciertos factores de seguridad, manipulación del gas y reacciones asociadas que complejizan el ensayo. Ante esto se debe analizar si el gas escogido es seguro, no reactivo, medible y no condensable.

La metodología por utilizar en el presente trabajo contempla usar al vapor de agua como gas trazador, ya que se cuenta con los datos de entrada suficientes para obtener las concentraciones en el interior y exterior. Para obtener la humedad absoluta del aire son suficientes las mediciones de temperatura y humedad relativa, como una relación representada en la carta psicrométrica.

Entre las complicaciones de escoger al vapor de agua como gas trazador se tiene:

- No singular: el vapor de agua es un constituyente que encontramos en el aire puro, por lo que dificulta la diferenciación de este.
- Condensación: el vapor de agua condensa fácilmente en las superficies de la envolvente. Sin embargo, este fenómeno solo se daría cuando las diferencias de temperatura fuesen lo suficientemente holgadas.
- Absorción higroscópica: algunos materiales absorben fácilmente la humedad en el aire.

Las metodologías usadas para calcular la tasa de renovación por medio de un gas trazador son: decaimiento de concentración, inyección constante y concentración constante (International, 2011). Estas se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 5-II: Metodologías de gas trazador. Fuente: (Navarrete, 2016).**

<b>Método</b>	<b>Decaimiento de concentración</b>	<b>Inyección Constante</b>	<b>Concentración Constante</b>
<b>Definición</b>	Se introduce una cantidad de gas, se mezcla con el aire del recinto y se observa la caída de concentración en el tiempo.	Se mantiene una emisión constante de gas contaminante durante todo el ensayo.	Se dosifica el gas contaminante durante el ensayo para mantener una concentración constante.
<b>Uso</b>	Medir velocidad de ventilación, infiltraciones de aire.	Medir velocidad de ventilación, caudal en conductos. Seguimiento de la contaminación	Medir velocidad de ventilación, caudal en conductos. Seguimiento de la contaminación
<b>Equipo</b>	- Fuente Contaminante - Ventilador - Medidor Concentración de Gas.	- Fuente Contaminante - Medidor de Flujo - Ventilador - Medidor Concentración de Gas	- Fuente Contaminante - Medidor de Flujo. - Ventilador. - Medidor Concentración de Gas. - Dosificador.

Para el caso de cuantificar la tasa de renovaciones de un espacio, el método que mejor se adecua a las circunstancias es el de decaimiento de concentración, por lo que se utiliza como base para la cuantificación de infiltraciones.

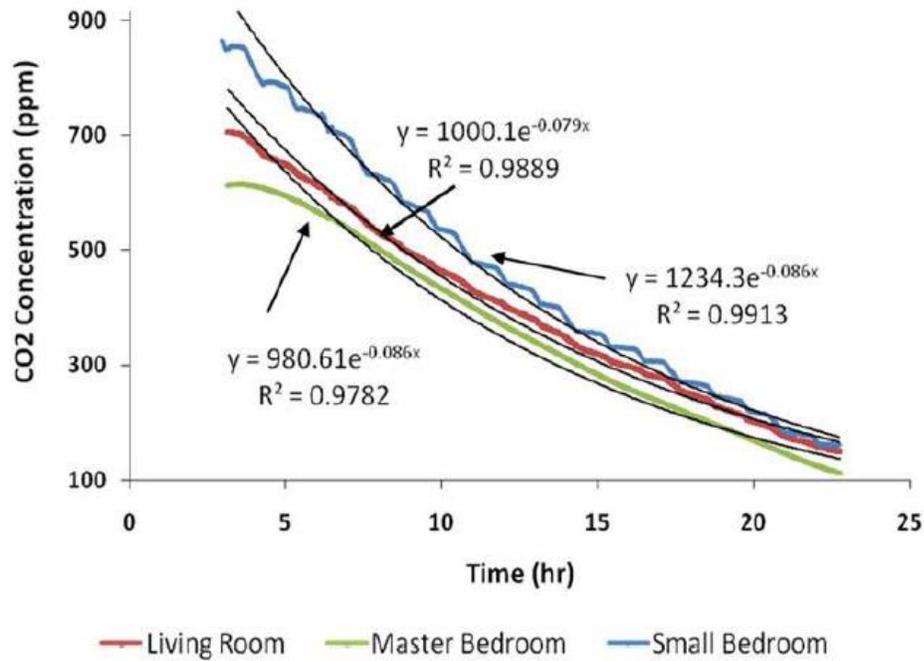


Figura 5-2: Curva esperada en decaimiento de concentración. Fuente: (Patel, Mitsingas, Miller, & Newell, 2011).

### 5.2.1 DECAIMIENTO DE CONCENTRACIÓN

El método consiste en introducir una pequeña cantidad de volumen de gas en la zona a medir y asegurar una concentración uniforme, para luego medir el descenso de concentración.

La norma ASTM E741 estipula que idealmente es de interés medir las variables tanto internas como externas que pudiesen afectar al experimento; tales como como la velocidad y dirección del viento; temperatura y otros factores meteorológicos. Para el caso de este estudio, los módulos Netatmo permiten medir la temperatura y humedad relativa tanto interna como externa al recinto, en rangos de tiempo cada media hora. Si bien, no es posible obtener el registro local de las presiones de viento que a la que es solicitada la envolvente, se tienen ciertas referencias meteorológicas que ayudan a identificar en qué fechas podrían existir velocidades de viento considerables.

En el caso de este estudio, el período de medición corresponde al intervalo de registro programado en los módulos de ReNaM, iguales a 30 minutos.

Para calcular la tasa de renovación, el método base es analizar la conservación de masa y volumen del gas trazador a partir de la fórmula de conservación de masa:

$$V \frac{dC}{dt} = Q_e \cdot C_e + M - Q_s \cdot C_s \quad (4)$$

Donde,

- V : Volumen de aire al interior de la envolvente [ $m^3$ ]
- $dC$  : Variación de la concentración del gas al interior del recinto [ $\frac{g}{m^3}$ ]
- $Q_e$  y  $Q_s$  : Caudal de entrada y salida, respectivamente [ $\frac{m^3}{hora}$ ]
- $C_e$  y  $C_s$  : Concentración de vapor de agua exterior e interior asociado al intervalo de tiempo [ $\frac{g}{m^3}$ ]
- M : Flujo de gas trazador por fuente de vapor de agua [ $\frac{g}{hora}$ ]

Luego, considerando que la fuente contaminante de vapor de agua no existe al iniciar el decaimiento,  $M = 0$ ; y que el caudal de entrada es el mismo que el de salida,  $Q_e = Q_s$ , se obtiene:

$$Q = \frac{V \frac{dC}{dt}}{C_e - C_s} \quad (5)$$

La concentración de vapor de agua es equivalente a la humedad absoluta del aire, por lo que  $C_e = HA_{ext}$  y  $C_s = HA_{int}$ . Si además consideramos que  $RAH = \frac{Q}{V}$ , se llega a la siguiente ecuación:

$$\frac{Ren}{h}(t) = \frac{1}{\Delta t} \cdot \ln \left( \frac{HA_{int}(t) - HA_{ext}(t)}{HA_{int}(t-1) - HA_{ext}(t)} \right) \quad (6)$$

Para llegar a esta ecuación se toman los siguientes supuestos:

- Densidad del aire constante a través del tiempo.
- Variaciones despreciables de la humedad absoluta entre los tiempos de medición.

Para el cálculo de infiltraciones, se toma un valor característico de la curva, correspondiente al obtenido cuando se evalúa la diferencia  $\Delta HA_{int}$  en su máxima pendiente, de manera de representar lo más cercano a la curva logarítmica que en teoría se debiese obtener.

Como se dijo anteriormente, el periodo de adquisición de la data configurado en ReNaM es cada media hora, por lo que  $\Delta t = 0,5$  [horas].

Para el cálculo de humedad absoluta, se transforma la humedad relativa en humedad absoluta a través del siguiente procedimiento:

$$HA = \frac{C \cdot P_V}{T}$$

Donde,

*HA*: Humedad absoluta [g de agua / m<sup>3</sup> de aire]

*P<sub>v</sub>*: Presión del vapor [Pa]

*C* = 2,16679 [g / KJ] = 2,16679 [gK / Pa·m<sup>3</sup>]: Constante

*T*: Temperatura [°K]

La presión de vapor *P<sub>vs</sub>* se calcula relacionando la presión de vapor saturado de acuerdo a la ecuación de Clasius-Clapeyron:

$$P_v = \left( A \cdot 10^{\frac{m \cdot T}{T + T_n}} \right) \cdot \frac{HR}{100}$$

Donde,

*HR*: Humedad relativa [%]

*T*: Temperatura [°C]

*A, m, T<sub>n</sub>*: Parámetros empíricos

Estos últimos parámetros se extraen de la siguiente Tabla:

<b>A</b>	<b>m</b>	<b>T<sub>n</sub></b>	<b>Rango de temperaturas [°C]</b>
6.116441	7,591386	240,7263	-20... +50
6.004918	7,337936	229,3975	+50... +100
5.856548	7,277310	225,1033	+100... +150
6.002859	7,290361	227,1704	+150... +200

Las temperaturas normales a utilizar se encuentran en el rango de la primera fila, por lo que se utilizan estos parámetros para el cálculo de la presión de vapor.

Finalmente, acoplado los parámetros, se llega a la siguiente ecuación (Cancino, 2016):

$$HA = \frac{13,25304}{273,15 + T} \cdot 10^{\frac{7,591386 \cdot T}{T + 240,7263}} \cdot HR \quad (7)$$

Con esto, se tienen las variables de entrada suficientes para cuantificar la tasa de renovaciones de aire en un recinto.

## 6 LIMITACIONES Y PROCEDIMIENTO

### 6.1 LIMITACIONES DEL MÉTODO

Se resumen las principales limitaciones de la metodología de decaimiento a implementar, divididas según restricciones provenientes de la base de datos, metodología y propias del análisis realizado.

#### **Limitaciones de base de datos y encuesta inicial**

- No se cuenta con información acerca de si las viviendas suscritas tienen mecanismos de ventilación natural o mecánica, por lo que se hace difícil tener ciertas nociones acerca de la proporción del intercambio en el flujo de aire que corresponde a ventilación controlada o infiltraciones de aire.
- La actividad de las personas al momento en que se toman las mediciones es incierta, así como la abertura de puertas y ventanas. En este sentido, tanto puertas como ventanas abiertas afectarían de forma significativa el cálculo de la tasa de renovación.
- El intervalo de medición y envío de registros al SMVA es de media hora, el cual podría no ser lo suficientemente bajo para recoger una cantidad de datos seguidos en decaimiento que represente fielmente la curva teórica. La norma ASTM E741 recomienda un muestreo de al menos diez datos de la curva en decaimiento.

#### **Limitaciones de metodología de gas trazador en decaimiento**

- No se tiene una fuente exclusiva que inyecte el vapor de agua para elevar la concentración interior. En lugar de eso, se utilizan como fuentes internas las actividades propias desarrolladas en una vivienda, como lo es el cocinar, uso de electrodomésticos, calentar agua, respiración humana, etc.
- No es posible asegurar que la concentración de humedad absoluta interior se encuentre uniformemente distribuida en el espacio total de vivienda o habitación medida. Los registros que se tienen provienen de mediciones en el entorno más próximo a la ubicación de los módulos.
- El vapor de agua no cumple con ciertas características ideales de un gas trazador. Estas se exponen en el capítulo 5.2.
- Dentro de la teoría, se reconoce que para velocidades de viento sobre 3 [m/s] las presiones de viento sobre la envolvente tienen una alta influencia en el cálculo de infiltraciones de aire.

#### **Limitaciones propias de análisis**

- Como se explicó anteriormente, no basta con conocer la velocidad y orientación del viento según información de estaciones meteorológicas, ya que se desprecia la topografía urbana y los fenómenos aerodinámicos que ocurren dentro de las ciudades. Por otro lado, la velocidad instantánea del viento es un valor impredecible y los productos meteorológicos usualmente entregan las velocidades medias diarias o mensuales.

## 6.2 PROCEDIMIENTO

En primer lugar, se obtienen las humedades absolutas en interior como en exterior según cada instante de tiempo. Para ello se utiliza la ecuación (7) que relaciona las variables de temperatura y humedad relativa. De esta manera, se tienen las variables de entrada suficientes para utilizar la ecuación (6).

Para el análisis de datos se deben tomar las siguientes condiciones:

- Como no existe una fuente puntual que provea un caudal inicial de vapor de agua y las cargas internas provienen de actividades normales de uso en las viviendas, se deben identificar intervalos de descenso de concentración de vapor de agua que idealmente representen una curva de decaimiento.
- Para garantizar que las concentraciones representan condiciones normales y no considerar los registros que presenten posibles desfases en la *subida* de data al sistema, la humedad absoluta interior **siempre** debe ser mayor o igual a la exterior.

Bajo estas condiciones se realiza el análisis y, según sea el caso, la muestra debe ser acotada para los requerimientos pertinentes.

## 6.3 PREPARACIÓN DE MUESTRA

La base de datos se obtiene directamente desde la página web de la ReNaM bajo un archivo tipo *Coma-Separated Values (CSV)*. El rango de tiempo considerado va desde el inicio del monitoreo de viviendas en el mes de enero del año 2016 hasta el mes de diciembre del 2017. A pesar de tener un extenso rango de tiempo para analizar, existe una cantidad no menor de “vacíos” en el registro continuo de algunas viviendas. Como se explicó en capítulos anteriores, estas discontinuidades provienen de desperfectos de operación que presentaba la plataforma, por lo que los datos más fiables se tienen desde los meses de otoño del 2017 en adelante.

La base de datos en sí presenta un formato bastante desordenado para aplicar las ecuaciones directamente. Es por esto que se utilizan los siguientes softwares en el trabajo realizado:

- Stata: la primera reestructuración de la base de datos se realiza mediante el software Stata para enlazar en la misma fila los datos de los sensores interiores con los del exterior. Adicionalmente, se diferencian los campos de una manera más amigable para compatibilizar con otros softwares.
- Microsoft Access: con Microsoft Access es posible trabajar los datos de una manera más dinámica para filtrar los campos de interés. Los tiempos que presentan registros *vacíos* se eliminan de la muestra si al menos una de las variables perteneciente a los campos de vivienda, fecha, hora, temperatura interior/exterior y humedad relativa interior/exterior se encuentra *nula* o *vacía*.
- Microsoft Excel: gran parte del trabajo estadístico y generación de tablas es realizado con Microsoft Excel, además de utilizarse como software para la

aplicación de las ecuaciones de humedad absoluta y cálculo de renovaciones de aire.

- MATLAB: el software MATLAB es utilizado para definir ciertas figuras y gráficos en tres dimensiones, dada la facilidad para trabajar matricial y vectorialmente en él.

### 6.3.1 FILTROS Y MUESTRAS

Se utilizan las siguientes muestras extraídas de la base de ReNaM, las que van decayendo en el número de registros según las condiciones de análisis estipuladas:

- **Muestra total:**  
Contiene todos los registros según el rango de tiempo mencionado anteriormente (2016-2017) y filtrados para descartar los valores nulos. Esta muestra contiene un total de 2.043.876 registros.
- **Muestra de Santiago en meses fríos (Muestra 2):**  
Corresponde a la muestra anterior filtrada según las viviendas localizadas en la Región Metropolitana y acotada entre los meses de mayo y agosto del año 2017.

Este filtro se basa en la necesidad de tener una muestra donde el efecto de las presiones de viento no intervenga de gran manera en los cálculos de renovaciones de aire. De esta forma, el filtro se fundamenta en que Santiago presenta periodos calmos de viento en los meses entre mayo y agosto, según los datos del año 2017 de la Dirección Meteorológica de Chile, mostrados en la Tabla 6-I. Además, durante estos meses se presentan las menores temperaturas del año. Esta última observación cobra importancia bajo el supuesto de que las puertas y ventanas de las viviendas se encuentran una mayor cantidad de tiempo cerradas con el fin de evitar el intercambio de temperatura con el exterior y por ende, representaría de una forma más fiel la tasa de infiltraciones existente en el local.

Los informes de *Viento predominante* del año 2017 para las ciudades que forman parte de la ReNaM, se encuentran adjuntos en el punto 10.2 Anexo 2 del presente documento.

**Tabla 6-I: Resumen mensual de velocidades de viento y orientación (Estación Quinta Normal, Santiago). Fuente: Dirección Meteorológica de Chile.**

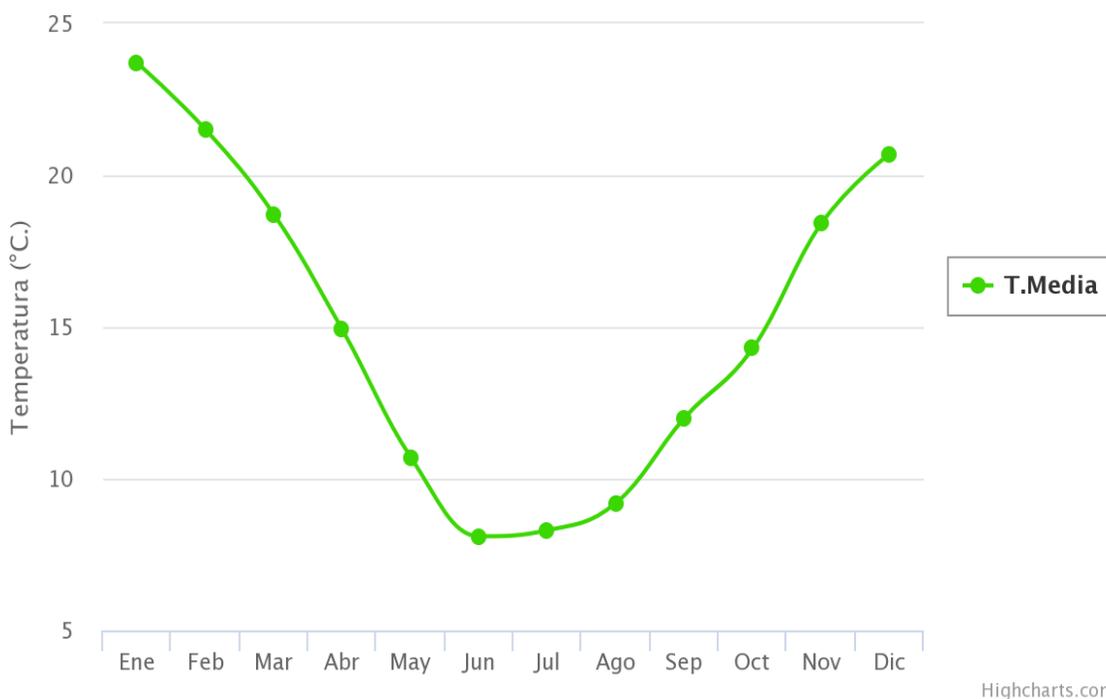
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Todas Las Horas	CALMA											
12 UTC	CALMA											
18 UTC	SW/5	SW/5	S/4	S/4	CALMA	CALMA	CALMA	S/3	SW/4	SW/4	S/5	S/6
00 UTC	S/4	S/4	S/4	CALMA	CALMA	CALMA	CALMA	CALMA	S/3	S/3	S/4	S/4
121800 UTC	S/4	S/4	S/4	CALMA	CALMA	CALMA	CALMA	CALMA	CALMA	S/4	S/4	S/4



**Figura 6-1: Registro de Velocidad del viento [m/s] de Estación Parque O'Higgins en meses de mayo a agosto del 2017. Fuente: Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).**

## Temperatura Media

Climatológica



**Figura 6-2: Temperaturas medias mensuales de año 2017 (Estación Quinta Normal, Santiago). Fuente: Dirección Meteorológica de Chile.**

La muestra tiene un total de 505.075 registros y se utiliza para analizar las curvas de distribución de las variables de entrada (temperatura y humedad relativa) y para el cálculo de humedad absoluta según la ecuación (7).

- **Muestra de Santiago con registros en decaimiento (Muestra 3):**  
Muestra se Santiago según los filtros aplicados en el caso anterior, pero considerando un filtro de horario que abarca entre las 22:00 horas hasta las 06:00am. El motivo de este filtro se justifica por el comportamiento promedio que muestra la humedad absoluta al interior de las viviendas monitoreadas, explicado en el punto 7.1.2 del presente documento.

Adicionalmente, solo se consideran los registros que cumplan con las siguientes condiciones:

- Condición 1: casos en que la concentración de vapor de agua interior se encuentra en decaimiento, es decir, que la diferencia entre la humedad absoluta del tiempo anterior de registro y la humedad del tiempo a evaluar es mayor a cero ( $HA_{int}(t - 1) - HA_{int}(t) > 0$ ).
- Condición 2: casos donde los registros tengan una humedad absoluta interior mayor a la humedad absoluta exterior.

Esta muestra contiene un total de 115.186 registros y se utiliza para el cálculo general de renovaciones de aire considerando la ecuación (8), para las cuales se utilizan los registros entre las 22:00 y 00:00 horas, que es donde se tienen las mayores pendientes de decaimiento de concentración interior.

## 6.4 PERSPECTIVAS DE ANÁLISIS

Como se explicó en capítulos atrás, cinco ciudades forman parte de la ReNaM, las que se encuentran distribuidas desde el norte hasta la zona austral del territorio nacional.

Se puede apreciar que existe una amplia diversidad climática en las ciudades de la red y por cómo se vio en capítulos anteriores, la influencia de los vientos y diferenciales de temperatura y humedad, son los principales factores que influyen en la tasa de infiltraciones. Luego, como se explica en el capítulo previo, el trabajo a realizar se centra en las viviendas de la ciudad de Santiago, por presentar velocidades de viento más favorables para utilizar la metodología del gas trazador.

Es de utilidad analizar la tasa media de renovaciones según propiedades intrínsecas de las viviendas u otras que influyan indirectamente en el comportamiento de las ventilaciones.

Luego, se toman las siguientes perspectivas para analizar las tasas de renovación, según la Muestra 3 de análisis:

- Año de construcción de vivienda.
- Materialidad principal de vivienda.
- Tipo de agrupación.
- Nivel Socioeconómico de ocupantes.
- Tipo de ventanas.

La información de las viviendas y de estas perspectivas es obtenida a través de la *encuesta inicial* que realiza ReNaM al representante del grupo familiar. Esta tiene como fin obtener datos que caractericen a las viviendas monitoreadas tanto en propiedades físicas de la edificación como en actividades rutinarias de los residentes.

Las perspectivas seleccionadas y la división según sus características se explican a continuación.

### 6.4.1 AÑO DE CONSTRUCCIÓN

El parámetro de año de construcción sirve para responder si es que existe cierta relación entre las exigencias normativas de la *Ordenanza general de urbanismo y construcciones*

La reglamentación térmica que es aplicada a nivel nacional busca controlar las pérdidas por transmisión a través de los materiales de la envolvente y no limita en absoluto las pérdidas por ventilación. Sin embargo, las aislaciones que regularmente son utilizadas para mejorar la resistencia de la envolvente pueden jugar a favor de mejorar la hermeticidad de la envolvente en la vivienda.

Los periodos de construcción utilizados para el análisis son los relacionados a las etapas progresivas de implementación de la norma técnica para el acondicionamiento térmico de las viviendas.

Como primera etapa, con vigencia desde el año 2000, se imparten las exigencias para complejos de techumbre (cielos, cubiertas, aislación térmica, etc); para luego; en el año 2007, continuar con los muros, pisos ventilados y superficies máximas de ventanas, según se señala en el Artículo N° 4.1.10 de dicho reglamento (Construcción, 2006).

Las ciudades que forman parte de ReNaM se ubican en las siguientes zonas térmicas:

**Tabla 6-II: Zonas térmicas según ubicación de viviendas.**

Ciudad	Zona térmica
Antofagasta	1
Valparaíso	2
Santiago	3
Temuco	5
Coyhaique	7

La tercera etapa de esta progresión consiste en aplicar el sistema de Calificación Energética de Vivienda (CEV), instrumento diseñado para estandarizar las viviendas con respecto a sus requerimientos de calefacción, enfriamiento, iluminación y agua caliente sanitaria.

La CEV cuenta con tres indicadores principales: Porcentaje de ahorro, Nivel de eficiencia energética (letra) y Requerimiento/Demanda energética. Estos indicadores son influenciados por la envolvente térmica de la vivienda, radiación solar expuesta, cargas internas, **renovaciones de aire**, comportamiento energético de equipos y la incorporación de energías renovables no convencionales (ERNC) (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, n.d.). Se destaca que esta tercera etapa es la primera medida energética que contempla las infiltraciones de aire como elemento influyente del desempeño energético de las viviendas.

La última actualización de la CEV se ha compartido en abril del presente año y sigue en etapa de mejora a partir de los aprendizajes y experiencias que acumula en su aplicación voluntaria.

El criterio de selección ReNaM respectivo al año de construcción establece los siguientes rangos, definidos por la implementación de la primera y segunda etapa de la reglamentación térmica:

**Tabla 6-III: Distribución de viviendas respecto a año de construcción.**

Año de construcción	Ciudad					Total general
	Antofagasta	Coyhaique	Santiago	Temuco	Valparaíso	
Después del 2007	7	2	37	24	25	95
Entre 2000 y 2007	5	3	23	9	10	50
Menor a 2000	18	5	90	17	26	156
			<b>150</b>			<b>301</b>

#### 6.4.2 MATERIALIDAD PREDOMINANTE

Tradicionalmente el uso de masa térmica ha sido atribuido a mejorar la respuesta higró-térmica de las edificaciones (Palma, 2017). A pesar de que la materialidad y volumen de la envolvente afectan directamente en la transmisión de calor y tiende a mejorar la permeabilidad de los elementos, las infiltraciones por uniones de puertas, ventanas y cielos siguen siendo importantes vías por donde no existe un control del flujo de aire. Luego, esta clasificación se entiende como el tipo de material predominante que forman los muros perimetrales de la vivienda en su mayoría.

Se definen cuatro clasificaciones de materialidad predominante en las viviendas:

- Adobe:  
El adobe es una mezcla de barro (arcilla y arena) y paja moldeada como ladrillo, sin cocer y secada al sol o aire. Este método es ampliamente usado en zonas rurales, sin embargo, en Chile se ha disminuido su uso en construcciones actuales, ya que este método no garantiza una adecuada ductilidad frente a cargas sísmicas.

Los elementos de adobe presentan una elevada permeabilidad al vapor de agua, por lo que, si los elementos constructivos de la vivienda no presentan un adecuado tratamiento hidrófugo, los cálculos de renovaciones de aire pueden verse alterados.

- Liviano:  
Referente a construcciones de tabiquería en madera u acero (Metalcom) con revestimientos en base a placas de OSB, fibrocemento o paneles yeso-cartón.

Las construcciones más artesanales de masa liviana tienden a tener una peor hermeticidad en su envolvente que construcciones más industrializadas o bajo procedimientos de construcción más controlados.

- Mediano:  
Referente a albañilería compuesta por ladrillos cerámico o bloques de hormigón, ya sea armado o en paños confinados por hormigón u acero.
- Pesado:  
Construcciones de hormigón armado en general.

Según estudios y mediciones realizadas por el DICTUC, mediante su unidad IICoS; con un clima base de la zona central, las viviendas con estructura en perfiles livianos son las que debiesen presentar mayores niveles de infiltración de aire (Ossio et al., 2012)(Madrid et al., 2012).

Por otro lado, se estima que las viviendas con una envolvente en base a muros de hormigón, albañilería y adobe presentarán una mejor permeabilidad en muros y elementos verticales, por lo que la mayor parte de las infiltraciones debiesen depender principalmente por grietas y uniones poco estancas de puertas, chimeneas,

ventanas y techumbre. En este sentido, las viviendas en adobe debiesen presentar una mayor tasa de infiltraciones entre las materialidades no livianas, ya que son casas de mayor antigüedad y usualmente construidas mediante métodos más artesanales.

**Tabla 6-IV: Distribución de viviendas respecto a materialidad predominante en envolvente.**

Materialidad predominante	Ciudad					Total general
	Antofagasta	Coyhaique	Santiago	Temuco	Valparaíso	
Adobe	0	0	5	0	5	10
Liviano	1	8	10	11	10	40
Mediano	6	2	63	16	18	105
Pesado	23	0	72	23	28	146
			<b>150</b>			<b>301</b>

#### 6.4.3 TIPO DE AGRUPACIÓN

La selección según tipo de agrupación se refiere al tipo de contacto en su envolvente que tiene cada vivienda respecto al grupos de construcciones vecinas a esta.

Mientras menos sean las superficies de muro compartidas y se tenga una mayor cantidad de fachadas hacia el exterior, la edificación debiese tender a ser menos estanca en términos de infiltraciones de aire, ya que se encontraría más expuesta fenómenos climáticos y tiende a presentar un mayor número de fisuras que dan hacia el exterior.

En la clasificación se tienen tres grupos para subdividir viviendas tipo casas y dos subgrupos de departamentos, clasificados según el número de lados que dan hacia el exterior.

**Tabla 6-V: Distribución de viviendas respecto a tipo de agrupación.**

Tipo de agrupación	Ciudad					Total general
	Antofagasta	Coyhaique	Santiago	Temuco	Valparaíso	
Adosada en ambos lados	0	2	13	0	0	15
Adosada en un lado	0	2	14	0	0	16
Aislada	0	5	17	0	0	22
Departamento	0	0	26	1	0	27
Departamento con más de una fachada al exterior	30	1	80	49	61	221
			<b>150</b>			<b>301</b>

#### 6.4.4 NIVEL SOCIOECONÓMICO DE OCUPANTES

La perspectiva de Nivel Socioeconómico (NSE) busca verificar si existe una relación entre una mayor estanqueidad de la vivienda respecto al estrato social de la familia habitante.

A pesar de que no es una propiedad intrínseca de la vivienda, usualmente las familias de NSE más alto pueden adquirir viviendas de mejor calidad, por lo que esta perspectiva debiese mostrar una menor tasa de infiltración en estratos altos y mayores en los estratos bajos.

Referenciando el mismo estudio del DICTUC mencionado anteriormente, explica que viviendas de estándar medio-alto construidas en albañilería pueden presentar hasta tres veces menores tasas de infiltración que sus símiles clasificadas como viviendas sociales.

**Tabla 6-VI: Distribución de viviendas respecto a Nivel Socio-Económico.**

NSE	Ciudad					Total general
	Antofagasta	Coyhaique	Santiago	Temuco	Valparaíso	
Alto	15	0	47	21	18	101
Bajo	7	0	48	9	18	82
Medio	7	10	55	20	25	117
En blanco / No hay información	1	0	0	0	0	1
			<b>150</b>			<b>301</b>

#### 6.4.5 TIPO DE VENTANAS

Además de tener mejores características referidas a resistencia térmica, las ventanas de Doble Vidrio Hermético (DVH) tienden a instalarse con marcos que cuentan con *rotura de puente térmico*, lo que indirectamente las vuelve más estancas al paso de caudales de aire. Por ende, se espera que viviendas que presenten ventanas hacia el exterior compuestas por DVH presenten menores tasas de renovación respecto a las compuestas por vidrio simple.

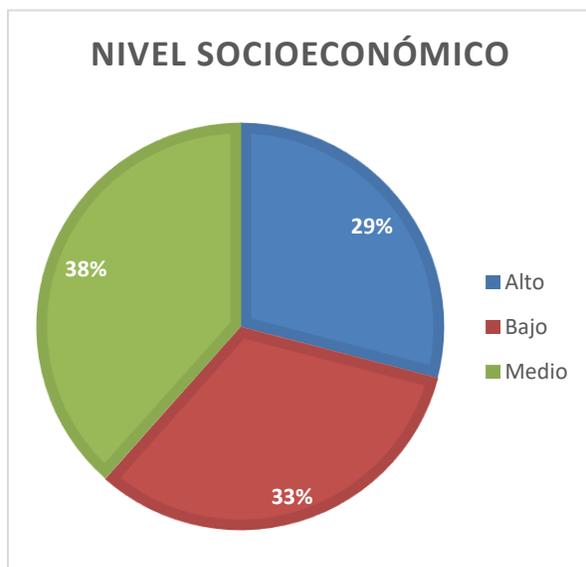
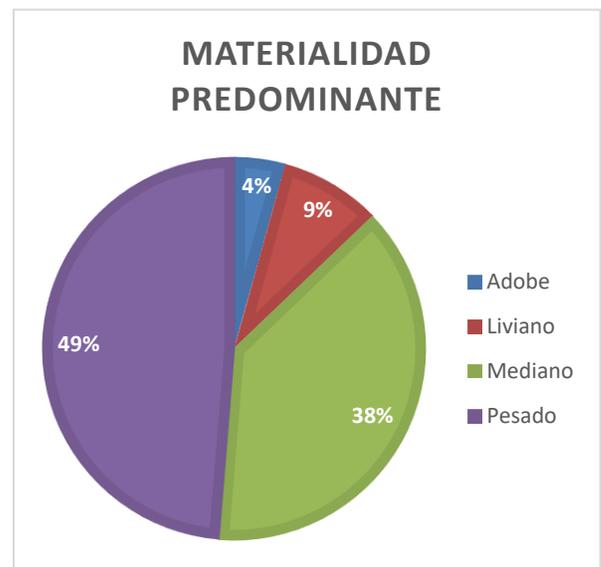
La encuesta inicial no cuenta con información completa para esta perspectiva, por lo que existe un subgrupo fuera de análisis.

**Tabla 6-VII: Distribución de viviendas respecto a tipo de ventana.**

Tipo de ventana	Ciudad					Total general
	Antofagasta	Coyhaique	Santiago	Temuco	Valparaíso	
En blanco / No hay información	0	0	27	0	0	27
Doble vidrio	2	4	34	22	19	81
Vidrio simple	28	6	89	28	42	193
			<b>150</b>			<b>301</b>

### 6.4.6 RESUMEN

La muestra 3 tiene un total de 116 viviendas y a continuación, se resumen sus distribuciones según las perspectivas anteriormente descritas.



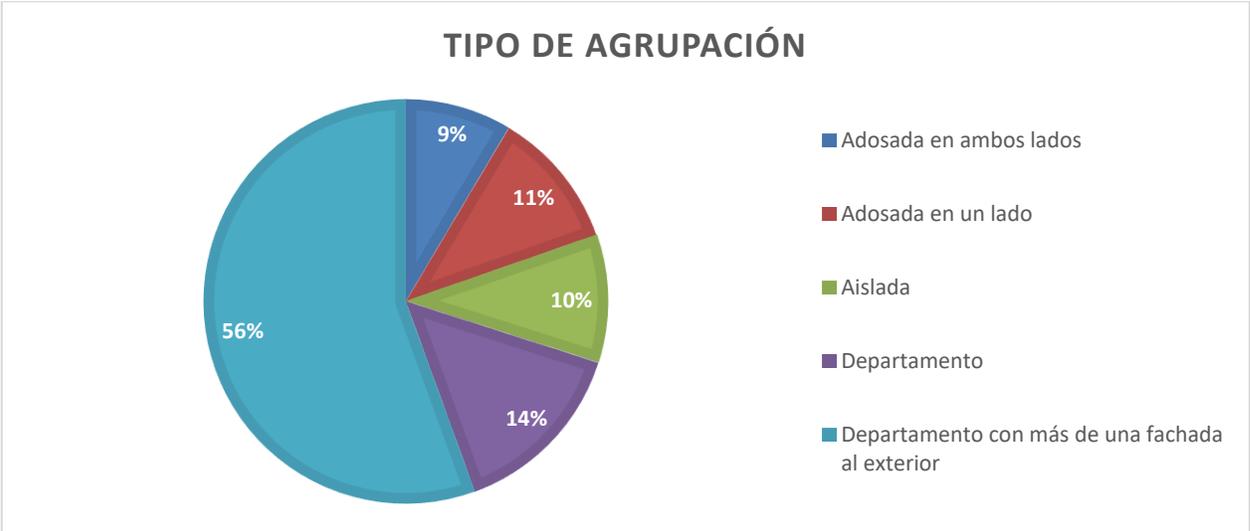


Figura 6-3: Distribución de viviendas de muestra 3 según perspectivas de análisis.

## 7 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 7.1 DISTRIBUCIÓN DE VARIABLES

Se recogen las variables de entrada según base de datos, tomando la Muestra 2 referente a la ciudad de Santiago durante los meses de mayo, junio, julio y agosto del año 2017; donde se describen las variables de temperatura y humedad relativa tanto en el exterior como en el interior. Las variables registradas por los módulos externos se comparan según los datos meteorológicos de la estación de Quinta Normal; que como se observa en la Figura 4-5, en registros de temperatura presenta datos medios representativos a la ciudad. En cambio, para registros de humedad relativa existen variaciones más dispersas entre estaciones meteorológicas, por lo que no deben tomarse como registros únicos para toda la ciudad de Santiago.

Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

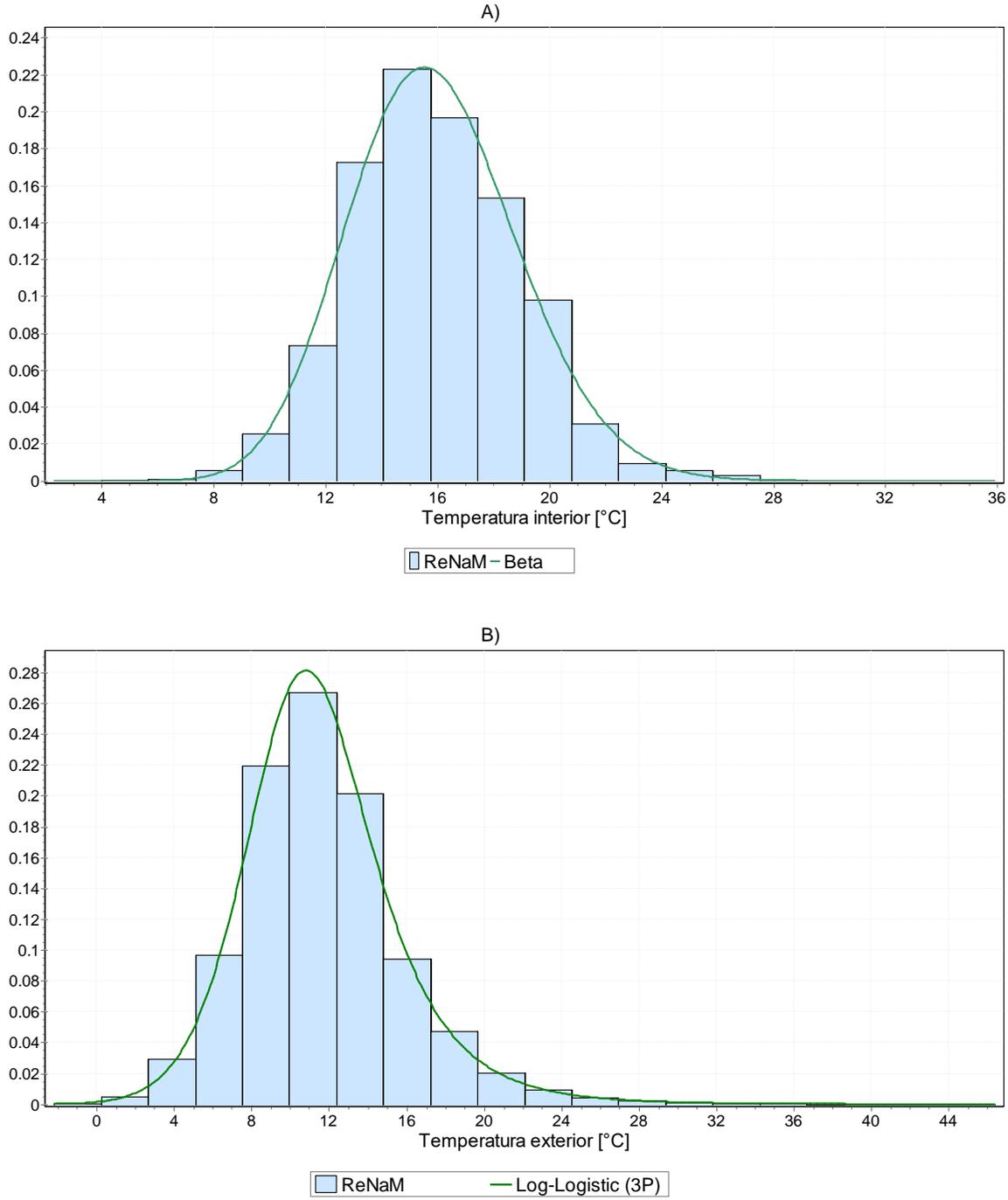
**Tabla 7-I: Análisis de temperatura y humedad relativa en interior y exterior para la ciudad de Santiago.**

	Mínimo	Media	Máximo	Desviación Estándar
<b>Temperatura Interior [°C]</b>	2,30	15,91	35,90	3,00
<b>Temperatura Exterior [°C]</b>				
ReNaM	-2,20	11,65	46,40	4,08
Estación Quinta Normal	-3,90	9,01	27,60	-
<b>Humedad Relativa Interior [%]</b>	28	66	100	10
<b>Humedad Relativa Exterior [%]</b>				
ReNaM	14	72	100	13
Estación Quinta Normal	-	80	-	-

El análisis de la data muestra ciertas incertidumbres respecto a los valores que se tienen. En primer lugar, de la Tabla 7-I se tiene que las mediciones de temperatura máxima interior se muestran muy por sobre las temperaturas esperadas y usuales en los meses fríos del año. A pesar de que las mediciones al interior de la vivienda se ven influenciadas por las fuentes internas de calor y la temperatura del aire depende de las propiedades de la envolvente térmica, una temperatura interior de 35,9°C escapa de la realidad climatológica y estado de confort para los usuarios del local; por lo que se estima como una medición errónea e/o inducida por una mala calibración del sensor, mal posicionamiento del módulo (cercanía a artefactos de calefacción o equipos que proporcionen una fuente de calor), etc. Sin embargo, al analizar las frecuencias de estos datos, tal como muestra la Figura 7-1 A), sobre los 28°C existe una baja densidad de estos.

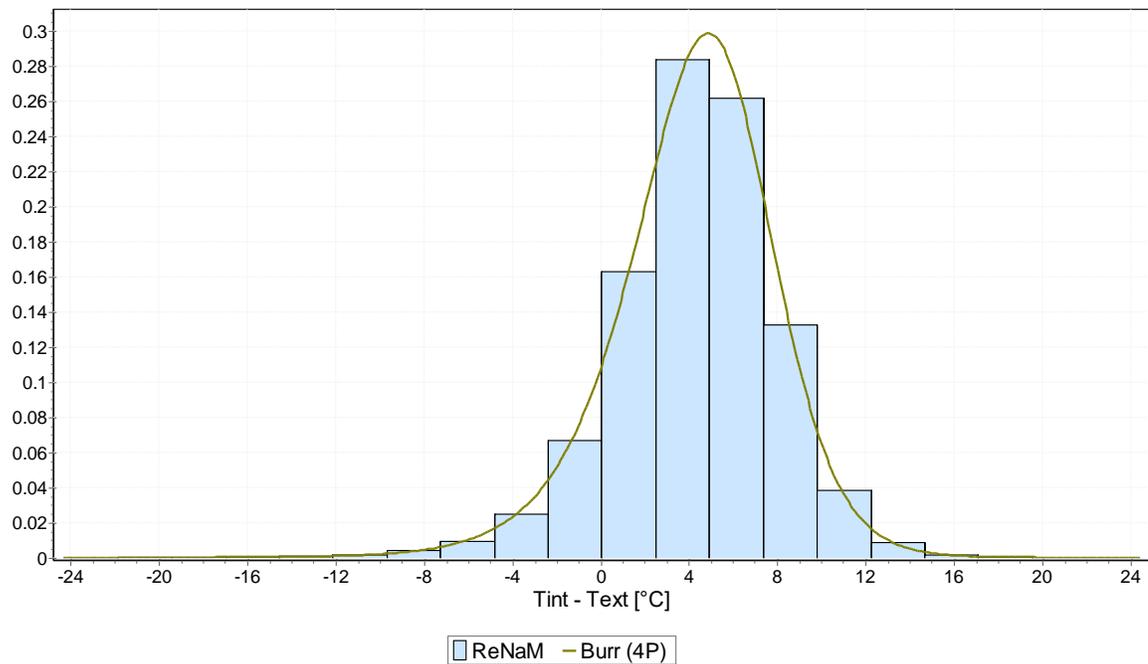
De igual manera que en el caso anterior, las mediciones exteriores de temperatura arrojan un valor máximo muy alto y se ven aumentadas al compararlas con las mínimas, medias y máximas registradas en la estación de Quinta Normal. Por otro lado, los registros de humedad relativa exterior muestran una disminución en su valor promedio en alrededor de diez puntos porcentuales al compararlo con el registro de la estación meteorológica.

Tanto en los registros de temperatura y humedad relativa interior de la Tabla 7-I muestran bajos valores de desviación estándar al compararlos con sus medias, por lo que no existe una fluctuación muy grande respecto al valor promedio.



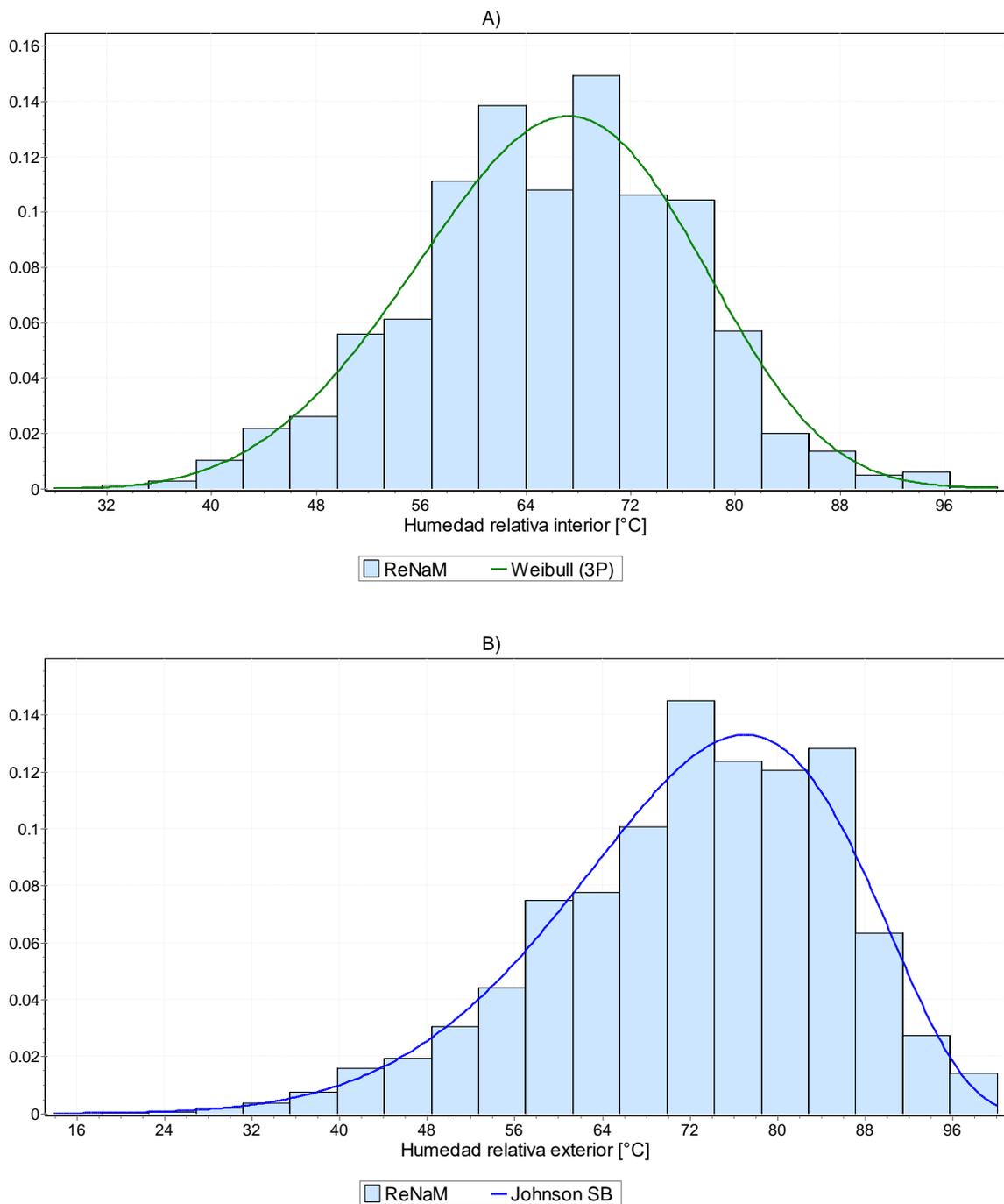
**Figura 7-1: Distribución de temperatura: A) Interna B) Externa según muestra de Santiago en meses fríos.**

La mayor densidad de datos de temperatura interior se concentra entre los 15 y 18 °C, siendo bastantes bajas para las condiciones de confort óptimo esperadas en meses de invierno (entre 18 y 21°C). Bajo 4°C y sobre 25°C existe una baja cantidad de registros al interior de la vivienda menor al 1% del total de la Muestra 2.



**Figura 7-2: Diferencia entre temperatura interior y exterior del aire seco.**

La diferencia de temperaturas internas y externas se concentra alrededor de los 4-5°C, lo que refuerza la idea de que las temperaturas internas, la cual es la variable independiente, es baja para los niveles de confort ideales de las personas. Cabe destacar, que los registros que presentan diferencias menores a cero, es decir, donde la temperatura exterior es superior a la interior concentran una densidad cercana al 10% de la Muestra 2.



**Figura 7-3: Distribución de humedad relativa: A) Interior B) Exterior.**

Los registros de humedad relativa interior y exterior no muestran distribuciones como *campanas perfectas*, siendo esto más notable en los registros de HR interior en la Figura 7-3 A) y en ambos casos, las curvas no se muestran tan centradas a sus valores promedios.

Las diferencias mostradas entre los registros y los datos meteorológicos oficiales de Santiago tienden a suponer que los sensores no se encuentran correctamente

calibrados o se ven influenciados por agentes externos como viento, exposición directa a radiación, ubicación en ambiente cerrado, etc.

Dadas estas breves observaciones se estima conveniente analizar en detalle el comportamiento de las variables recién descritas. Para realizar esto se seleccionan las viviendas monitoreadas que pertenecen a la comuna de Quinta Normal, ya que presentan de una manera localizada las variables climatológicas registradas por ReNaM respecto a los datos de la estación meteorológica ubicada en la misma comuna.

### 7.1.1 ANÁLISIS COMPARATIVO SEGÚN REGISTROS DE QUINTA NORMAL

Se realiza el ejercicio de comparar las mismas variables recién analizadas, temperatura y humedad, según los registros medrados por los módulos externos de ReNaM y los registros de la estación Quinta Normal. La muestra de viviendas se limita a las pertenecientes a la comuna de Quinta Normal en los rangos de fecha estipulados anteriormente (mayo – agosto, 2017).

Tabla 7-II: Características de viviendas de Quinta Normal.

ID	Ciudad	Comuna	Tipo de vivienda	Materiales predominantes de la Vivienda	NSE	Rango año construcción	Tipo de ventana
2	Santiago	Quinta Normal	Aislada	Mediano	Medio	Menor a 2000	Vidrio simple
91	Santiago	Quinta Normal	Departamento	Pesado	Bajo	Después del 2007	Vidrio simple
149	Santiago	Quinta Normal	Departamento con más de una fachada al exterior	Pesado	Bajo	Menor a 2000	Vidrio simple

Para evitar el error asociado que podría generar el soleamiento del sensor externo, se toman como días base de estudio cuando no exista radiación solar en magnitudes considerables. Para conocer esto, se utiliza como fuente de información los *Informes solarimétricos* del año 2017, elaborados por el Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada, adjuntados en el Anexo 3: Informes solarimétricos.

De esta manera, se comparan los registros de los días 22, 23 y 24 de junio del 2017 donde se tiene una radiación incidente menor a 1 MJ/m<sup>2</sup> en las tres jornadas.

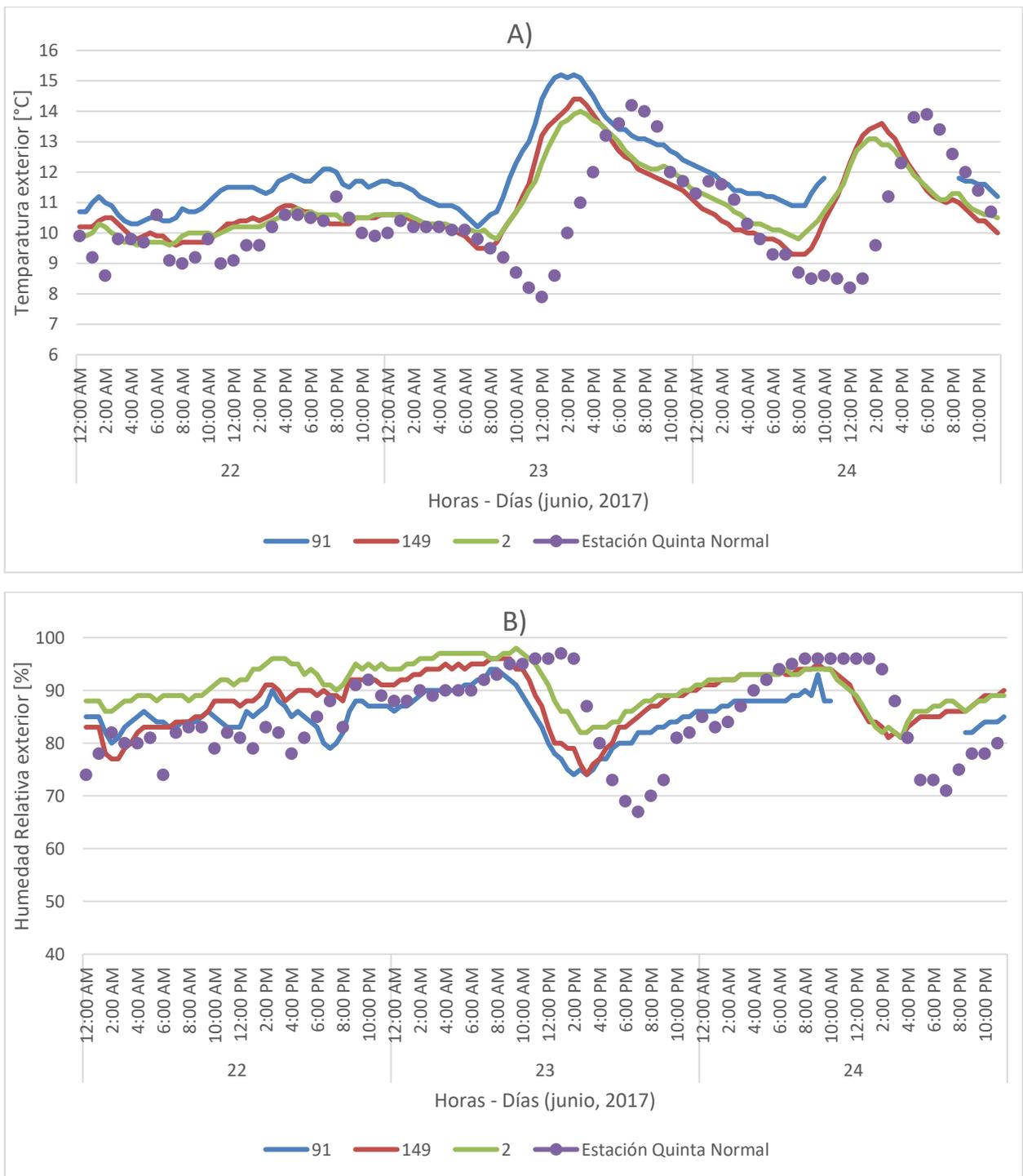


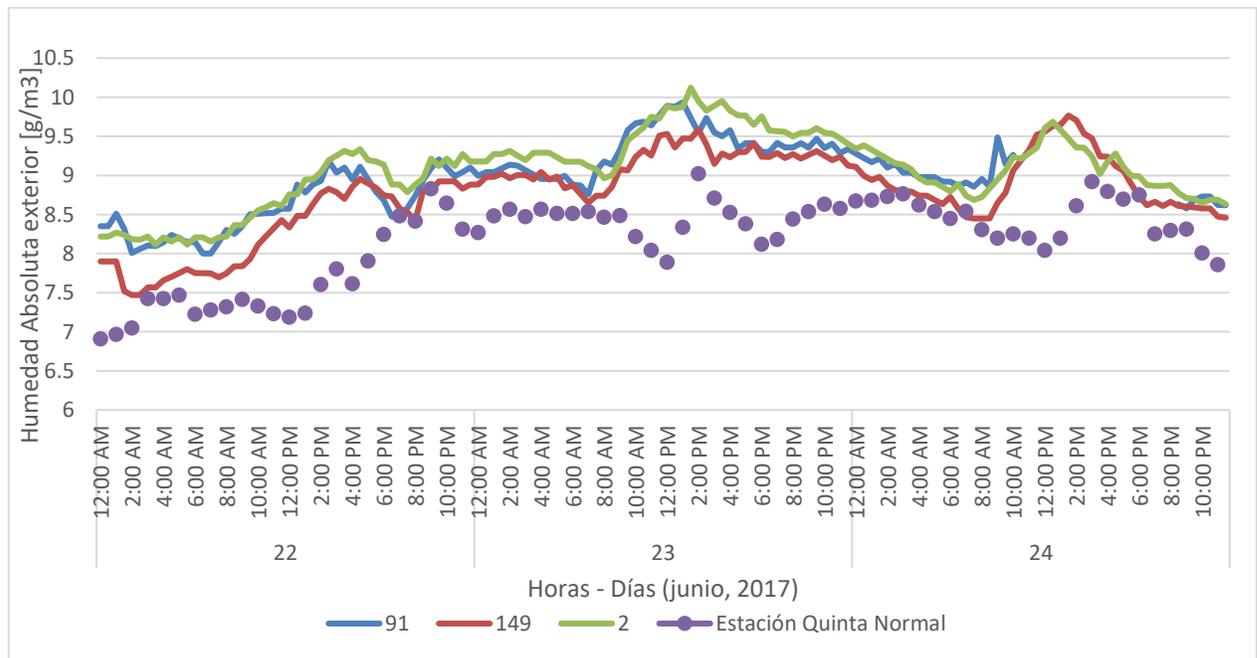
Figura 7-4: Mediciones externas de: A) Temperatura B) Humedad Relativa. Comuna de Quinta Normal.

En las figuras expuestas se observa, en primer lugar, que tanto la temperatura como la humedad relativa presentan un desfase de alrededor de dos (2) horas respecto a los registros de la estación base. Sin embargo, para el caso de estudio, no presenta una mayor problemática, ya que los registros de ReNaM entre las variables interiores y exteriores muestran un comportamiento similar en sus pendientes, por lo que no se aprecia un desfase claro dentro de los registros del SMVA. Luego, las repercusiones

que podría generar esto, es a la hora de definir peaks o mínimos de acuerdo a horarios puntuales, por lo que se debe tener en cuenta que toda definición en tiempo trae consigo un error negativo relacionado a este desfase.

Siguiendo el argumento anterior, las curvas de las viviendas monitoreadas presentan comportamientos similares a los registros de la estación, tanto en forma como en peaks y valles de la data.

Luego, se calcula la humedad absoluta tanto en los registros de las viviendas como en los datos entregados por la estación Quinta Normal, obteniendo lo siguiente:



**Figura 7-5: Cálculo externo de humedad absoluta. Quinta Normal.**

En la Figura 7-5 nuevamente se observa un traslado y desfase de la curva de Quinta Normal, originado por la propagación de errores de las variables de temperatura y HR.

Dado que posteriormente se realizará un análisis diario de las variables evaluadas, es pertinente corregir los registros de la base de datos según el desfase observado. De esta manera, se corrigen los registros según el grado de desfase observado en las fechas seleccionadas, correspondientes al 22, 24 y 24 de junio del 2017.

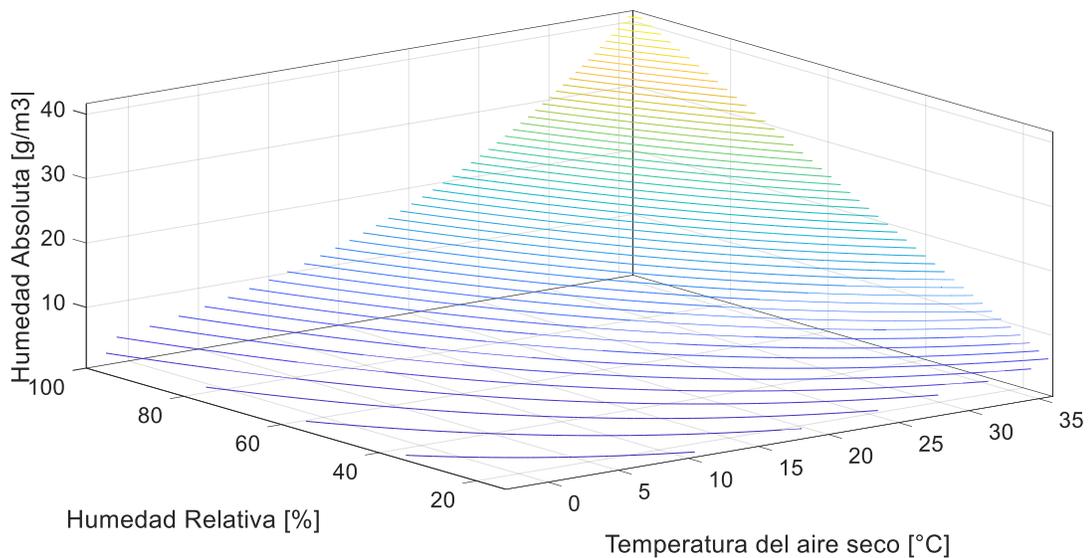
Finalmente, para obtener una muestra más exacta de acuerdo a los valores esperados; se limita la muestra a analizar según los datos que presentan temperaturas, tanto internas como externas, inferiores o iguales a 35°C. Los registros por eliminar del análisis representan menos del 1% del total de la muestra, por lo que prácticamente no se ve afectado el tamaño de esta.

### 7.1.2 ANÁLISIS DE HUMEDAD ABSOLUTA

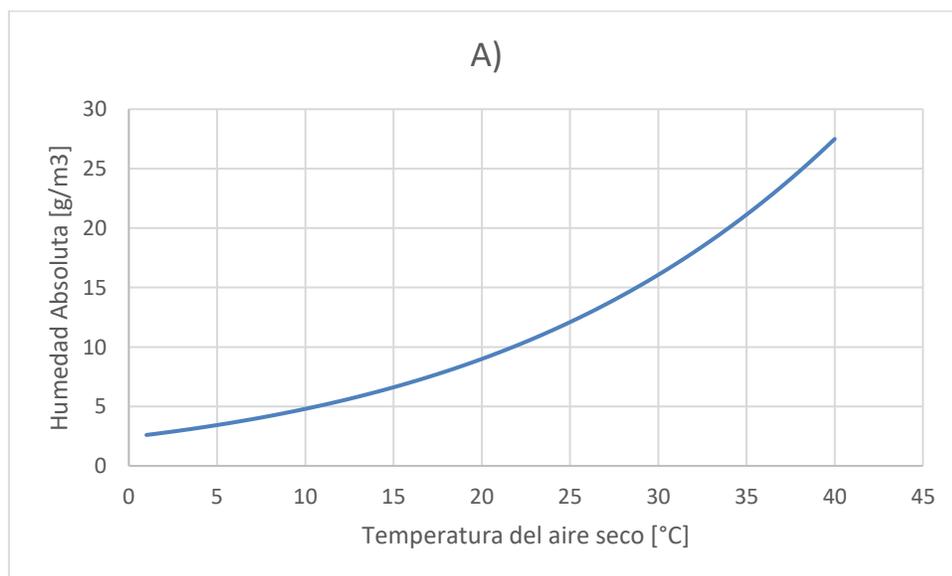
En primer lugar, se analiza la sensibilidad de la humedad absoluta en la Ecuación (9) según las variables de temperatura y humedad relativa. Para esto se grafica la

variación de humedad absoluta alterando ambas variables independientes en el rango de temperaturas y humedades relativas externas que se exponen en la Tabla 7-I.

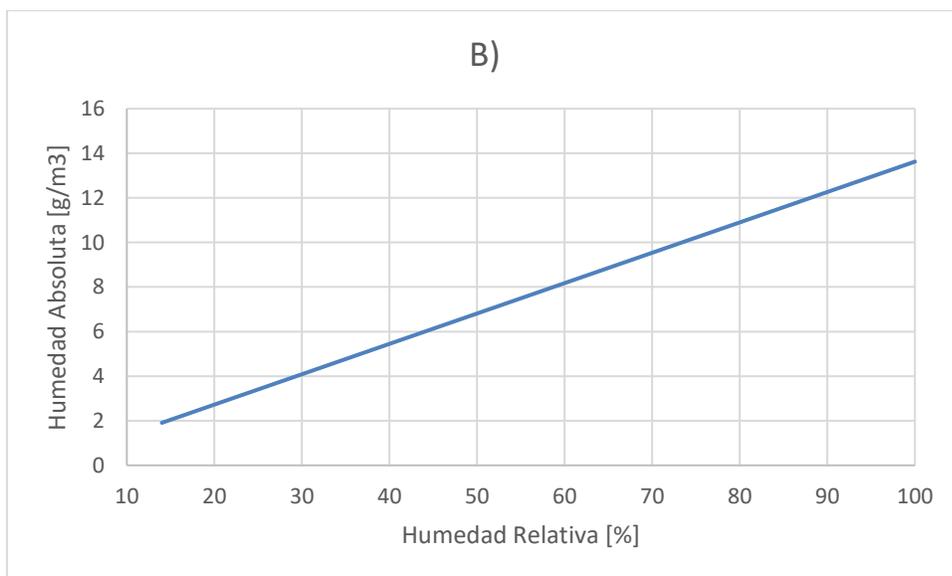
Luego, se fija la humedad relativa según la media obtenida de la misma Tabla 7-I con el fin de visualizar el comportamiento de la ecuación teniendo como única variable independiente a la temperatura. El procedimiento se repite, pero fijando la temperatura y dejando como variable libre a la humedad relativa.



**Figura 7-6: Gráfico tridimensional de variación de Humedad Absoluta respecto a temperatura y humedad relativa.**



Como se observa en las figuras, el comportamiento exponencial de la Ecuación (10) al depender de la temperatura presenta una alta influencia en la humedad absoluta, con una diferencia de alrededor de 25 [g/m³] entre el máximo y mínimo valor expuesto en la Figura 7-7 A).



**Figura 7-7: Variación de humedad absoluta respecto a: A) Temperatura B) Humedad relativa.**

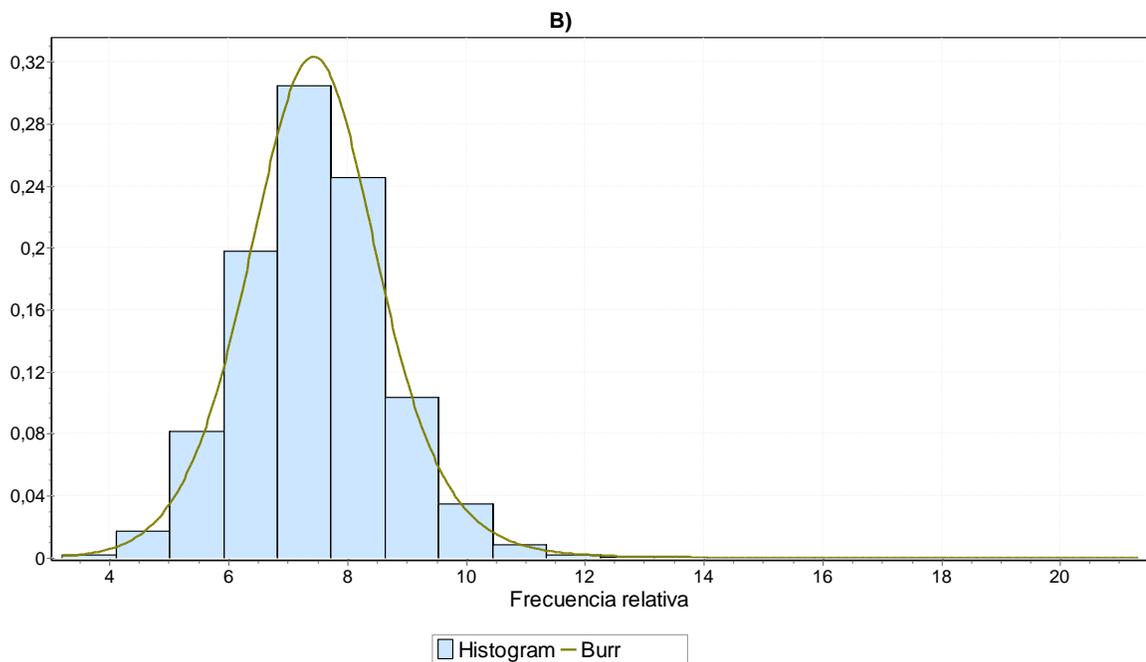
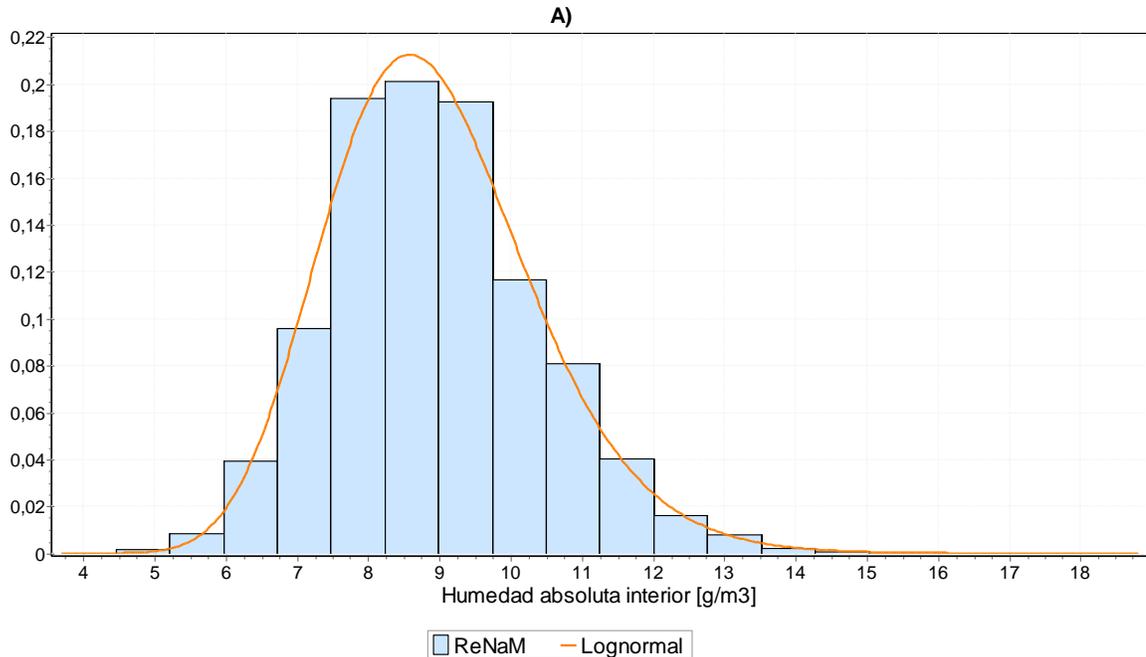
Luego, la humedad relativa también tiene una influencia significativa en la variación de la humedad absoluta y es de forma lineal. Si se compara con la curva presentada en la Figura 7-7 B), la diferencia entre el máximo y mínimo de humedad absoluta es menor, sin embargo; por lo observado en la Figura 7-1 y Figura 7-3, la HR presenta una dispersión mayor en sus valores, variando de manera más heterogénea que la temperatura.

Se complementa el ejercicio de sensibilidad al analizar los resultados de humedades absolutas obtenidos según la ecuación de relación psicométrica (7) al aplicarlos sobre la Muestra 2 y Muestra 3.

**Tabla 7-III: Análisis de humedad absoluta interior y exterior para la ciudad de Santiago.**

	<b>Muestra</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Media</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desviación Estándar</b>
<b>Humedad Absoluta Interior [g/m³]</b>	2: May - Ago	3,70	8,93	18,80	1,46
	3: Decaimiento	3,77	8,91	16,95	1,45
<b>Humedad Absoluta Exterior [g/m³]</b>	2: May - Ago	3,20	7,47	21,31	1,21
	3: Decaimiento	3,20	7,18	14,84	1,16

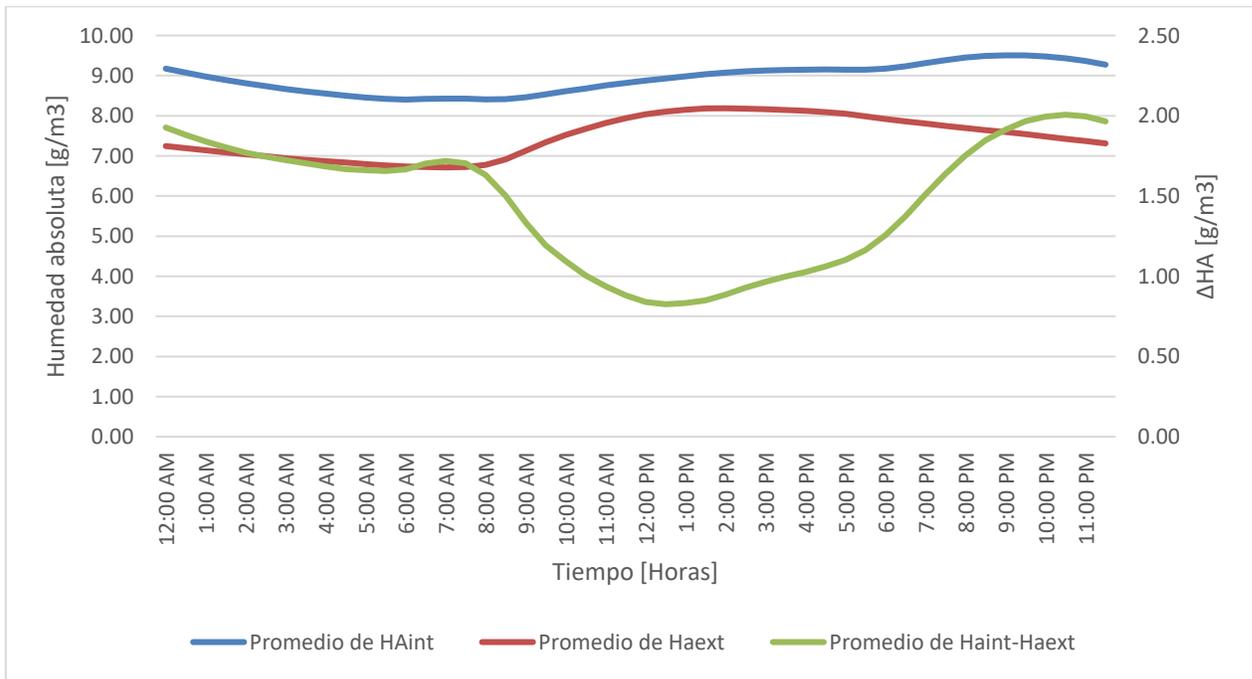
Se repiten procedimientos previos y se adjuntan las curvas de distribución de humedad absoluta interior y exterior, considerando la Muestra 3.



**Figura 7-8: Distribución de Humedad Absoluta: A) Interior B) Exterior.**

Ambos gráficos de la Figura 7-8 muestran distribuciones bastante simétricas, con curvas *alargadas* hacia valores altos y una alta probabilidad de obtener una variable cercana a la media. La curva de humedad absoluta interior muestra una distribución más heterogénea que la curva de humedad absoluta exterior.

La Figura 7-9 muestra la variación media de humedad absoluta interna y externa a lo largo del día, junto con la diferencia existente entre estas dos variables.



**Figura 7-9: Medias de humedad absoluta a lo largo del día.**

Esta figura muestra la tendencia de humedad absoluta exterior a seguir el comportamiento diario de la temperatura ambiente, concentrando sus mínimos antes del horario de amanecida. En tanto, la humedad absoluta interior muestra una tendencia de aumentar la concentración de vapor de agua a partir de las 8-9am y 6-7pm, y comenzar a disminuir alrededor de las 10:00pm.

Siguiendo la línea de comportamiento, la diferencia entre humedades interior y exterior tiende a aumentar en pendiente desde el inicio del horario activo, el cual corresponde al horario donde los residentes utilizan en mayor medida la vivienda luego del horario laboral. La curva de HA interior llega a su peak a las 10:00pm, para luego descender paulatinamente. Luego, hasta las 6:00am, se llega a un valle en la curva de HA y comenzar nuevamente a ascender.

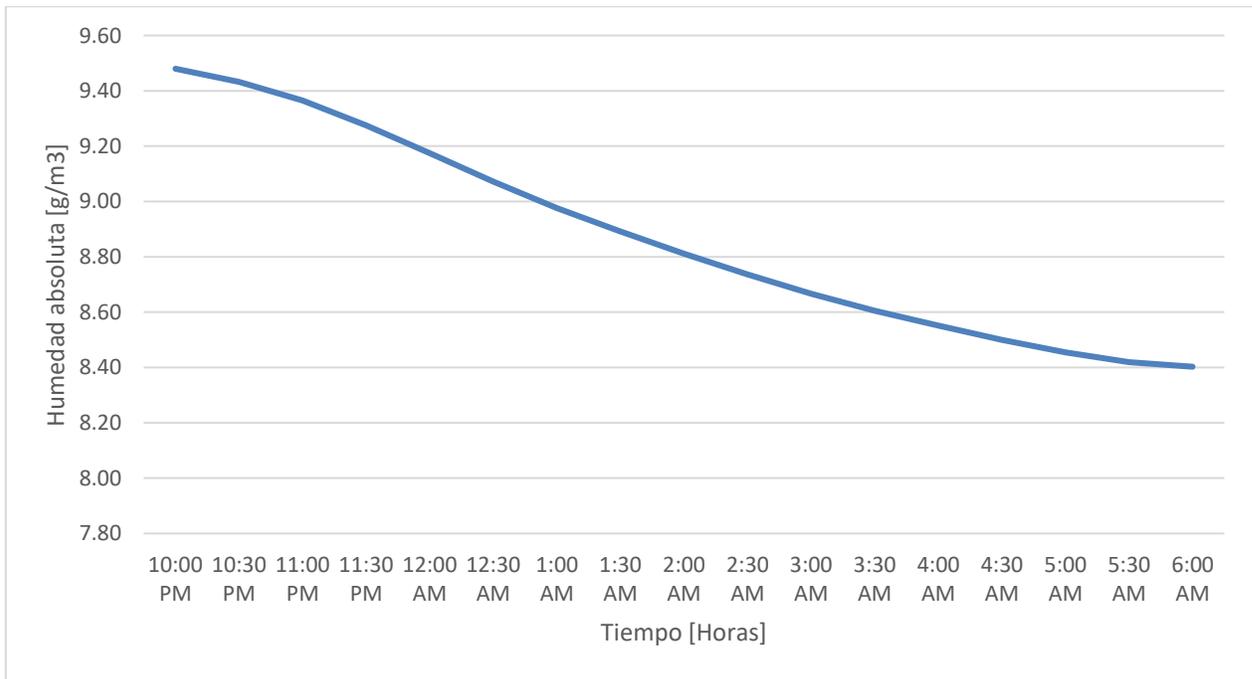


Figura 7-10: Media de Humedad Absoluta interior en rango horario en decaimiento.

Debido a este comportamiento y con el fin de asimilar la curva de HA interior al comportamiento teórico que se espera tener al aplicar el método del gas trazador, es que el cálculo de infiltraciones de aire se acota al rango horario entre las 10:00pm y 6:00am.

Dentro de este rango horario, los primeros registros resultan ser de interés, ya que es donde se tienen los mayores descensos promedios de humedad absoluta y, por ende, donde se debiesen reflejar de mejor manera el efecto de las infiltraciones. Bajo este argumento, la tasa de infiltraciones característica de cada curva diaria se calcula considerando el continuo de registros que presente la mayor pendiente de humedad absoluta interior durante el rango horario entre las 22:00 y 00:00.

## 7.2 DISTRIBUCIÓN DE INFILTRACIONES

Para analizar la forma en que la humedad absoluta afecta al cálculo de la tasa de renovaciones, se analiza la manera en que la diferencia de humedades se relaciona en base a la Ecuación (6). Para esto se utilizan dos variables auxiliares: la diferencia de humedad absoluta interior entre los periodos  $t-1$  y  $t$  de registro y la diferencia entre la humedad absoluta interior y exterior en el tiempo  $t$ . Este procedimiento se aplica sobre la muestra acotada de decaimiento de concentración (Muestra 3), utilizada para el cálculo de renovaciones, y la muestra total de análisis durante los meses fríos (Muestra 2).

$$\Delta HA_{int} = HA_{int}(t - 1) - HA_{int}(t) \quad (11)$$

$$\Delta HA = HA_{int}(t) - HA_{ext}(t) \quad (12)$$

En tanto, la Tabla 7-IV entrega estadística de las variables exiliars según muestra.

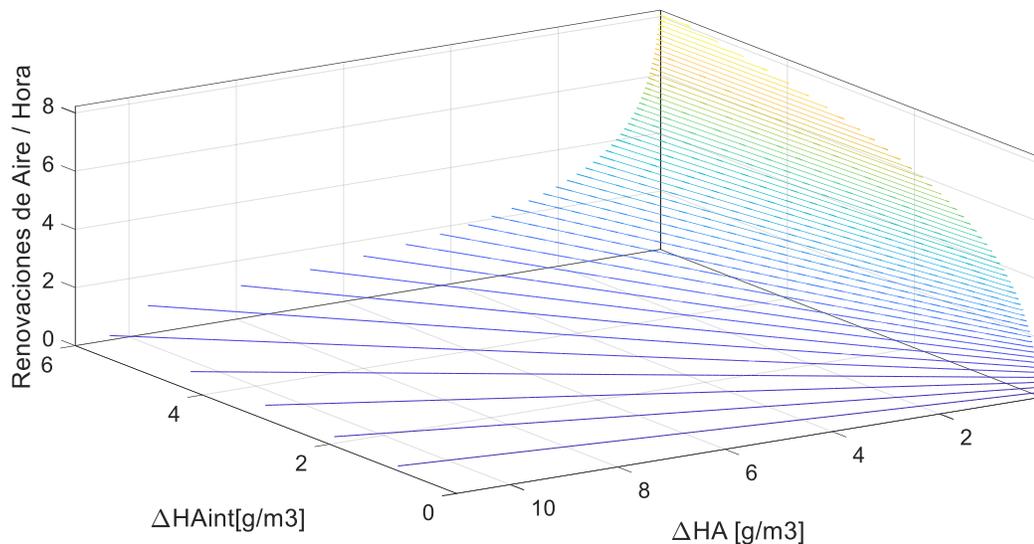
**Tabla 7-IV: Estadística descriptiva de variables de humedad absoluta.**

Variable	Muestra	Mínimo	Media	Máximo	Desviación Estándar
$\Delta HA_{int}$	2: May - Ago	-6,59	0,00	5,93	0,25
	3: Decaimiento	0,00	0,15	5,58	0,18
$\Delta HA$	2: May - Ago	-11,36	1,46	11,80	1,35
	3: Decaimiento	0,00	1,73	10,16	1,17

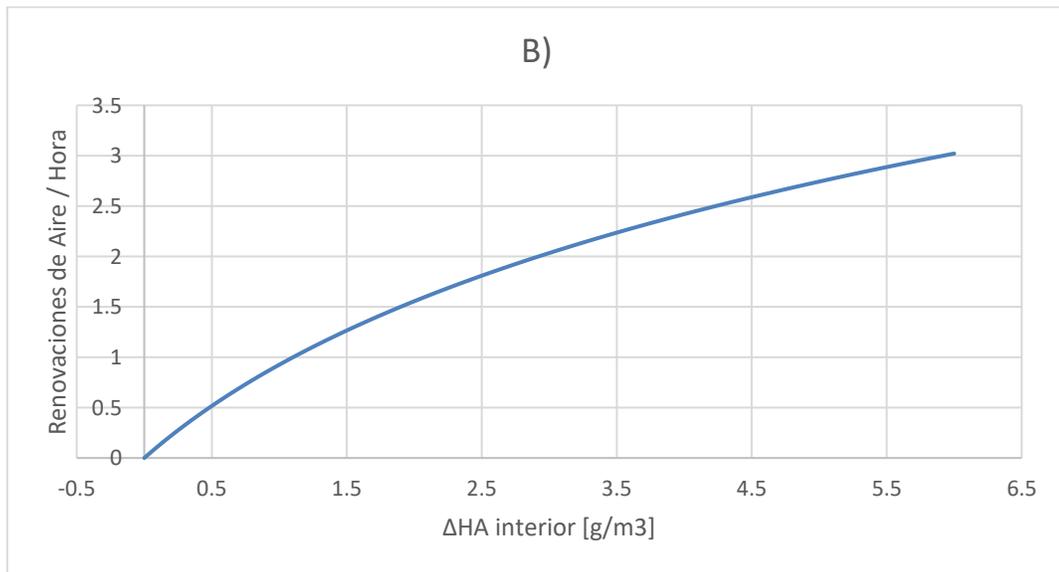
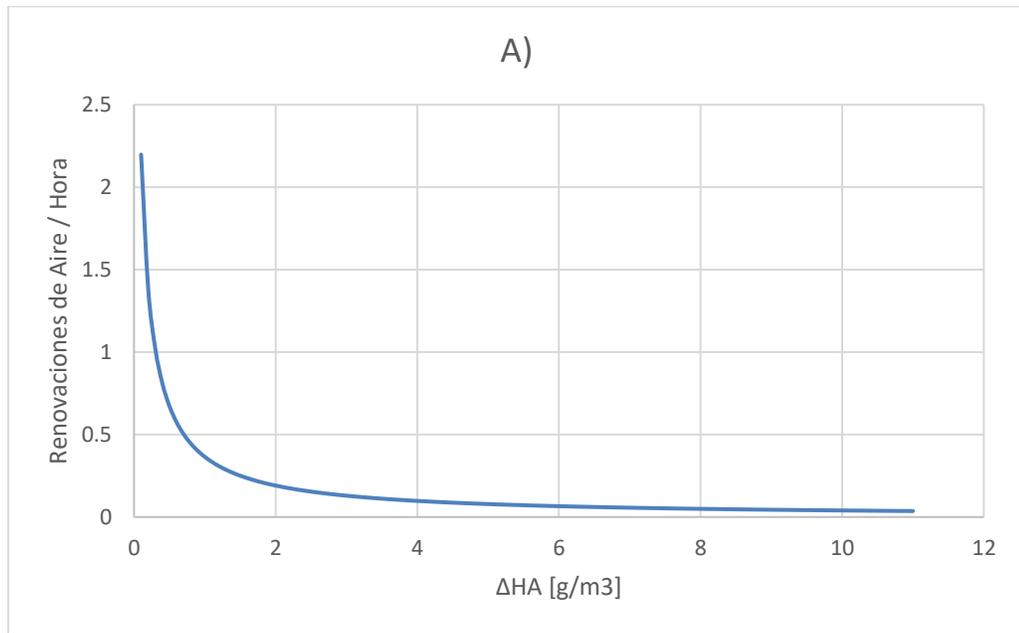
En ambas variables el mínimo es igual a 0 en la Muestra 3, ya que responde a que no se consideran registros fuera de rangos en decaimiento de concentración y registros que donde no se cumpla que la humedad absoluta interior sea mayor o igual a la humedad absoluta exterior.

Como la ecuación es dependiente de ambas variables (8) y (9), la sensibilidad se observa en conjunto, para luego ver el comportamiento por separado. En este último caso, como referencias se toman los valores promedio obtenidos de la Tabla 7-IV; y en ambos casos el rango entre el mínimo y máximo de estas según la Muestra 3.

La Figura 7-11 grafica el “manto” de la tasa de renovaciones respecto a las dos variables independientes definidas anteriormente y la Figura 7-12 presenta la sensibilidad de la ecuación (6) de RAH cuando es modificada una de las variables de humedad absoluta y manteniendo la otra constante. Luego, se realiza el mismo procedimiento intercambiando la variable a modificar y la fija. El rango utilizado para graficar este comportamiento es el comprendido entre los mínimos y máximos mostrados en la Tabla 7-III, según la Muestra 2 de decaimiento. En tanto, como valores fijos de referencia se utilizan las medias indicadas en la misma tabla.



**Figura 7-11: Gráfica en tres dimensiones de Renovaciones de aire / Hora.**



**Figura 7-12: Sensibilidad de RAH a la variación de variables de humedad absoluta.**

Los resultados de esto muestran el comportamiento logarítmico-exponencial de la ecuación, con un fuerte descenso en un principio al aumentar la diferencia de humedad entre interior y exterior. Por otro lado, como es de esperar, la diferencia de humedades interiores entre los lapsus de tiempo presenta una curva logarítmica. Esto implica que a medida que aumenta la tasa de renovaciones, la pendiente entre los registros de decaimiento aumente exponencialmente. En general, en ambos gráficos de la Figura 7-12 se observa que las variables influyen sobre la curva de renovaciones entre los mismos rangos; de 0 a 3 [Ren / Hora] aproximadamente.

Luego, se calcula la tasa de renovación en RAH a partir de la Muestra 3.

En las siguientes tablas, y con el fin de independizar variables por separado, se observan los valores promedios de RAH calculados, humedades absolutas y temperatura al distribuir una de ellas en rangos como factor independiente.

**Tabla 7-V: Promedios de humedades y renovaciones bajo rangos de diferencia de temperatura interior y exterior.**

$\Delta T$ [°C]	Frecuencia relativa	Humedad Absoluta interior [g/m <sup>3</sup> ]	Humedad Absoluta exterior [g/m <sup>3</sup> ]	RAH	Desvest RAH
<0	0,72%	9,34	8,98	1,04	1,06
0-4	22,65%	8,94	7,67	0,35	0,58
4-8	57,22%	9,33	7,34	0,25	0,39
8-12	17,80%	9,81	6,86	0,21	0,27
12-16	1,57%	10,25	6,35	0,17	0,22
>16	0,04%	9,90	5,25	0,17	0,30
	<b>100,00%</b>	<b>9,34</b>	<b>7,33</b>	<b>0,27</b>	<b>0,44</b>

La Tabla 7-V indica que, bajo la Muestra 3 de análisis, los valores más frecuentes de diferencia entre temperatura interna y externa se mueven en el rango entre los 4 y 8°C; manteniendo un comportamiento similar al mostrado en la Figura 7-2. La variable libre de esta magnitud es la temperatura interior de la vivienda, por lo que se explica la tendencia de HA interior en aumentar a medida que crece la primera y la relación inversa que existe respecto a la HA exterior. Como la brecha entre humedades aumenta en el mismo sentido de crecimiento de  $\Delta T$ , la tasa de renovaciones de aire tiende a disminuir. Del mismo modo, esto se refleja en el gráfico de la Figura 7-11 y en la Tabla 7-VI.

**Tabla 7-VI: Promedios de humedades y renovaciones bajo rangos de  $\Delta HA$ .**

$\Delta HA$ [g/m <sup>3</sup> ]	Frecuencia relativa	Humedad Absoluta interior [g/m <sup>3</sup> ]	Humedad Absoluta exterior [g/m <sup>3</sup> ]	$\Delta T$ [°C]	RAH	Desvest RAH
0-1	23,26%	8,18	7,63	4,22	0,60	0,77
1-2	30,82%	8,87	7,37	5,33	0,22	0,20
2-3	25,56%	9,69	7,22	6,44	0,15	0,13
3-4	13,39%	10,53	7,09	7,33	0,12	0,10
4-5	5,04%	11,39	6,97	8,43	0,11	0,10
>5	1,93%	12,52	6,88	9,69	0,10	0,10
	<b>100,00%</b>	<b>9,34</b>	<b>7,33</b>	<b>5,86</b>	<b>0,27</b>	<b>0,44</b>

Al igual que como ocurre en la Muestra 2, la Tabla 7-VI exhibe que la diferencia de humedad absoluta interior y exterior presenta una frecuencia mayor en el rango de valores comprendidos entre 0 y 3 [g/m<sup>3</sup>]. En tanto, que el promedio de RAH del rango 0-1 [g/m<sup>3</sup>] sea tan alto en comparación a los demás rangos de diferencia, responde al comportamiento exponencial de la ecuación presentado en la Figura 7-12 A).

Tabla 7-VII: Promedios de humedades y temperaturas bajo rangos de renovaciones.

Renovaciones de aire / Hora	Frecuencia relativa	$\Delta T$ [°C]	$\Delta HA$ [g/m <sup>3</sup> ]	$\Delta HA_{int}$ [g/m <sup>3</sup> ]	Desvest RAH
0-0,1	32,12%	6,45	2,66	0,08	0,02
0,1-0,2	28,77%	5,82	2,15	0,16	0,03
0,2-0,3	15,02%	5,61	1,82	0,24	0,03
0,3-0,4	7,90%	5,50	1,54	0,29	0,03
0,4-0,5	4,52%	5,39	1,30	0,32	0,03
0,5-0,6	2,82%	5,22	1,09	0,34	0,03
0,6-0,7	1,78%	5,27	0,92	0,35	0,03
0,7-0,8	1,28%	5,59	0,85	0,39	0,03
0,8-0,9	1,07%	5,41	0,76	0,40	0,03
0,9-1	0,77%	5,43	0,72	0,43	0,03
>1	3,96%	4,65	0,39	0,41	1,19
	<b>100,00%</b>	<b>5,86</b>	<b>2,01</b>	<b>0,19</b>	<b>0,44</b>

A pesar de que la media calculada de infiltraciones de aire bordea las 0,3 [Ren/hora], la mayor frecuencia de datos se presenta en el rango entre 0 y 0,1 [Ren/hora]. En este rango se tiene una diferencia media  $\Delta T$  de 6,45°C; coincidente con el rango de mayor densidad expuesto en la Tabla 7-V, y una diferencia media de humedades absolutas igual a 2,66 [g/m<sup>3</sup>], sin coincidir con el rango máximo de frecuencia mostrado en la Tabla 7-VI.

La distribución de registros de la Muestra 3 según horarios diarios es mostrada en la Figura 7-13. De esta se obtiene que la mayor parte de los registros de la muestra 3 presentan frecuencias bastante similares, aumentando el número de registros pasada la media noche.

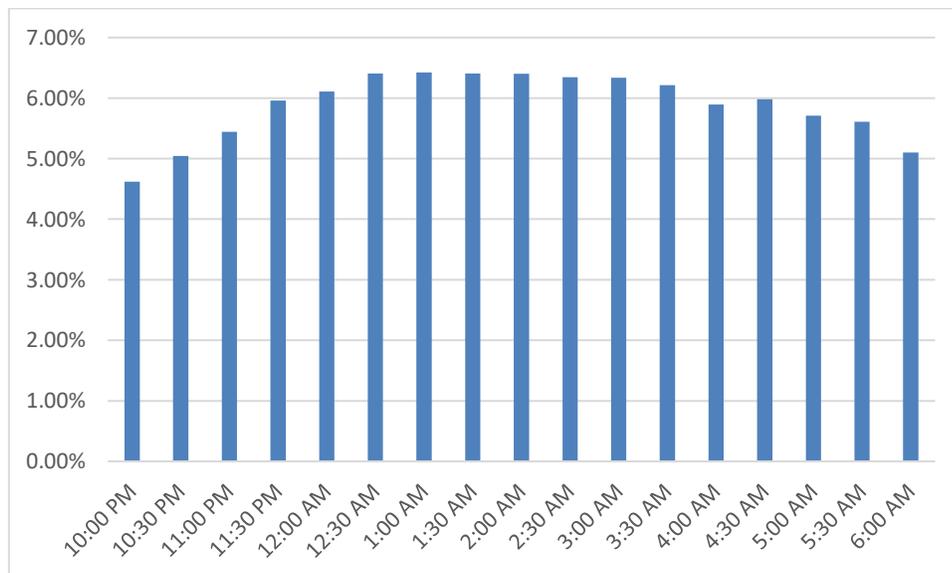


Figura 7-13: Distribución horaria de registros en decaimiento de concentración.

Replicando el ejercicio realizado anteriormente, la Figura 7-14 muestra el comportamiento promedio diario de las renovaciones de aire, acoplando las curvas medias diarias de  $\Delta HA$  y  $\Delta HA_{int}$ .

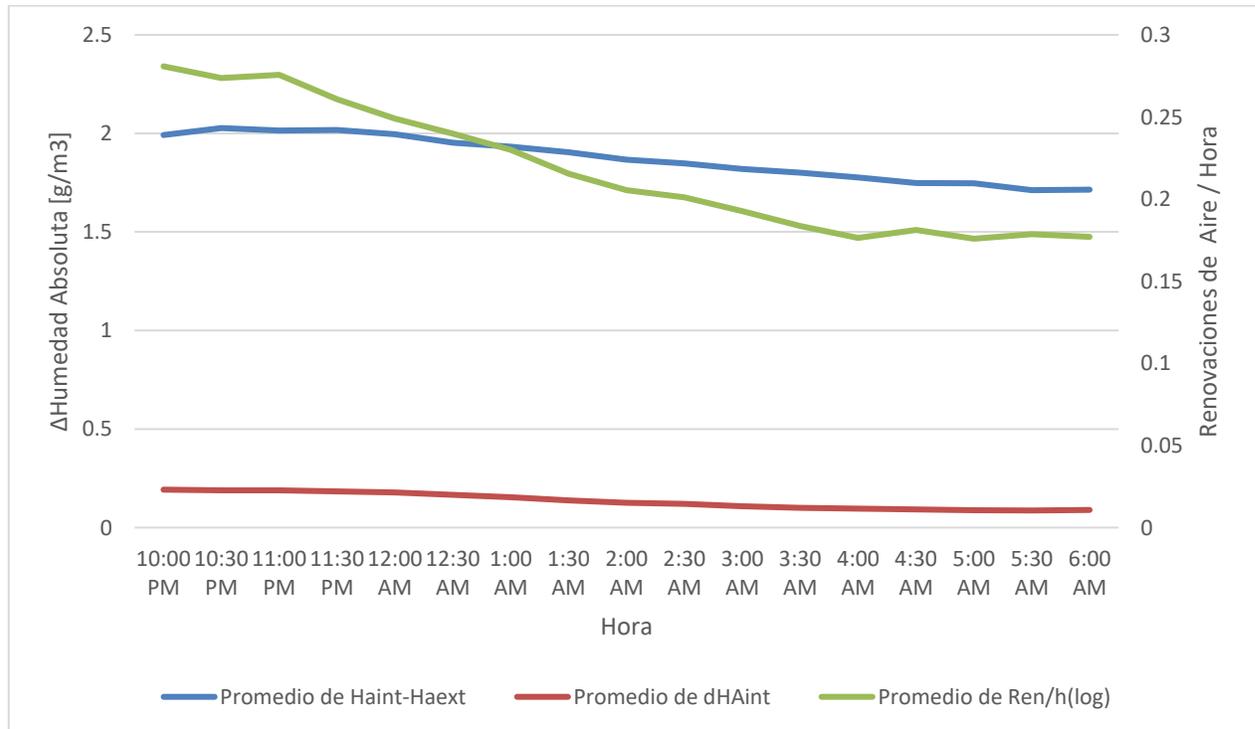


Figura 7-14: Distribución diaria de renovaciones de aire.

La diferencia interior entre registros de humedades  $\Delta HA_{int}$  presenta fluctuaciones bastante bajas a lo largo del rango horario evaluado, si se compara con la diferencia entre humedades externas. A priori, esto implica que la variable  $\Delta HA$  tiene una mayor “fuerza” para cuantificar la tasa de renovaciones.

La HA exterior queda fuera del control de confort ambiental de las viviendas, por lo que la ecuación (6) se comporta según la lógica de que, a una mayor tasa de infiltraciones de aire, la HA interior se reduce y, por ende, la diferencia entre la humedad absoluta interior y exterior tiende a ser menor.

La diferencia de humedad absoluta interior entre dos tiempos en decaimiento decrece en proporción inversa respecto a la tasa de renovación y, como se visualiza en la Figura 7-13, esta no presenta variaciones muy grandes a lo largo de una noche promedio. Sin embargo, como se verá en el posterior análisis, es un indicador de importancia a la hora de calcular la tasa máxima de renovaciones.

En tanto, la siguiente tabla acopla las variables diarias anteriormente analizadas.

**Tabla 7-VIII: Promedio de variables según horario.**

<b>Hora</b>	<b>Frecuencia relativa</b>	<b>HA interior</b>	<b>HA exterior</b>	<b>RAH</b>	<b>Desvest RAH</b>
10:00 PM	4,62%	9,41	7,42	0,28	0,44
10:30 PM	5,04%	9,39	7,36	0,27	0,44
11:00 PM	5,44%	9,32	7,31	0,28	0,48
11:30 PM	5,96%	9,26	7,25	0,26	0,39
12:00 AM	6,11%	9,17	7,17	0,25	0,42
12:30 AM	6,41%	9,06	7,10	0,24	0,36
1:00 AM	6,42%	8,97	7,04	0,23	0,37
1:30 AM	6,41%	8,88	6,98	0,22	0,38
2:00 AM	6,40%	8,80	6,93	0,21	0,36
2:30 AM	6,34%	8,71	6,86	0,20	0,35
3:00 AM	6,34%	8,62	6,81	0,19	0,35
3:30 AM	6,21%	8,54	6,74	0,18	0,36
4:00 AM	5,89%	8,47	6,70	0,18	0,28
4:30 AM	5,98%	8,42	6,67	0,18	0,36
5:00 AM	5,71%	8,33	6,58	0,18	0,36
5:30 AM	5,61%	8,27	6,56	0,18	0,33
6:00 AM	5,10%	8,23	6,51	0,18	0,37
	<b>100,00%</b>	<b>8,81</b>	<b>6,93</b>	<b>0,22</b>	<b>0,38</b>

### 7.3 RENOVACIONES MEDIAS SEGÚN PERSPECTIVAS

A pesar de que se obtienen altas variaciones en el cálculo de infiltraciones de aire, resulta interesante analizar estas según distintas perspectivas propias de las viviendas y de esta manera verificar qué propiedades de una edificación podrían tener una mayor influencia en la estanqueidad de esta, al menos en el aspecto global.

De acuerdo con las perspectivas consideradas, se revisan las medias y valores máximos de las renovaciones de aire obtenidas según cálculo en los registros al inicio de cada curva diaria de decaimiento. Además, se grafican las curvas de RAH según horario nocturno y subdivididas en los grupos respectivos.

Esta distribución se genera considerando los datos totales referentes a la Muestra 3.

### 7.3.1 MATERIALIDAD

Tabla 7-IX: Renovaciones según materialidad predominante en envoltorio de vivienda.

Materialidad predominante	Cantidad de viviendas		RAH		
	Frecuencia porcentual	Conteo	Media	Máximo	Desviación Estándar
Adobe	4,31%	5	0,35	0,66	0,38
Liviano	8,62%	10	0,50	1,56	0,49
Mediano	38,79%	45	0,35	1,29	0,21
Pesado	48,28%	56	0,43	1,79	0,43

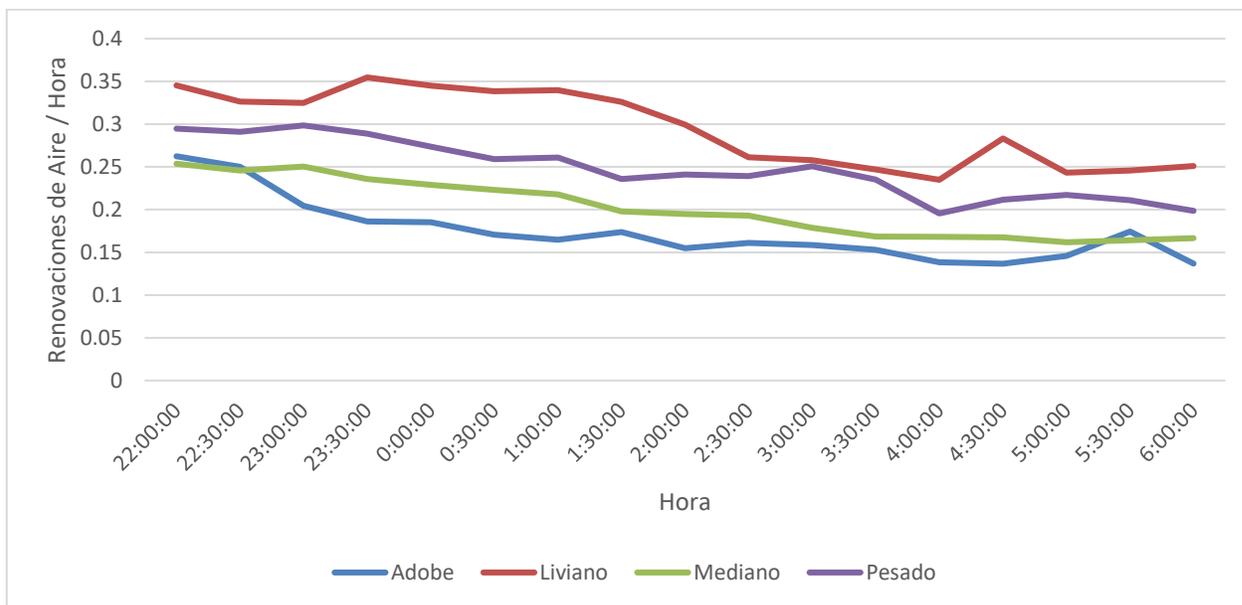


Figura 7-15: Curvas de renovaciones de aire en horario nocturno según materialidad predominante en envoltorio de vivienda.

Los materiales predominantes en la envoltorio que presentaron mayores y menores tasas de infiltración promedios son las viviendas construidas en estructura liviana y adobe junto con estructuras medianas, respectivamente.

Las infiltraciones en muros de estructura liviana usualmente son consecuencia de un diseño y construcción deficiente, ya que al compararlas con los demás materiales y considerando espesores típicos del arreglo, se intuye que las infiltraciones ocurren a través de los muros, además de las juntas y sellos, siendo estos más permeables que en otras configuraciones de muro.

El caso del adobe es un tanto curioso, ya que, si bien presenta altos espesores de muro, su construcción usualmente es bastante rústica, por lo que es esperable que los sellos entre puertas y ventanas no presenten grandes niveles de estanqueidad. Sin perjuicio de lo anterior, las construcciones en adobe para la ciudad de Santiago solo abarcan el 3% del total de viviendas monitoreadas, por lo que la representatividad de los resultados particulares sobre este material puede ser cuestionada.

La materialidad pesada en hormigón está presente en un poco menos de la mitad de las viviendas de la muestra, seguida de las viviendas en albañilería (mediana) que representa casi un 40% de la muestra. La Tabla 7-IX indica que las construcciones pesadas tienen una mayor tasa de renovaciones promedio que la materialidad mediana o en albañilería, presentando el mismo comportamiento en las curvas de la Figura 7-15. Considerando que en muros de ambas materialidades las infiltraciones mayoritariamente se debiesen producir en puertas y ventanas, el nivel de estanqueidad de la envolvente depende de la condición en los sellos y ventanas y la calidad de estos mismos.

### 7.3.2 AÑO DE CONSTRUCCIÓN

Tabla 7-X: Renovaciones según año de construcción de vivienda.

Año de construcción	Cantidad de viviendas		RAH		
	Frecuencia porcentual	Conteo	Media	Máximo	Desviación Estándar
Después del 2007	23,28%	27	0,32	1,43	0,31
Entre 2000 y 2007	18,10%	21	0,42	1,19	0,42
Menor a 2000	58,62%	68	0,43	1,79	0,37

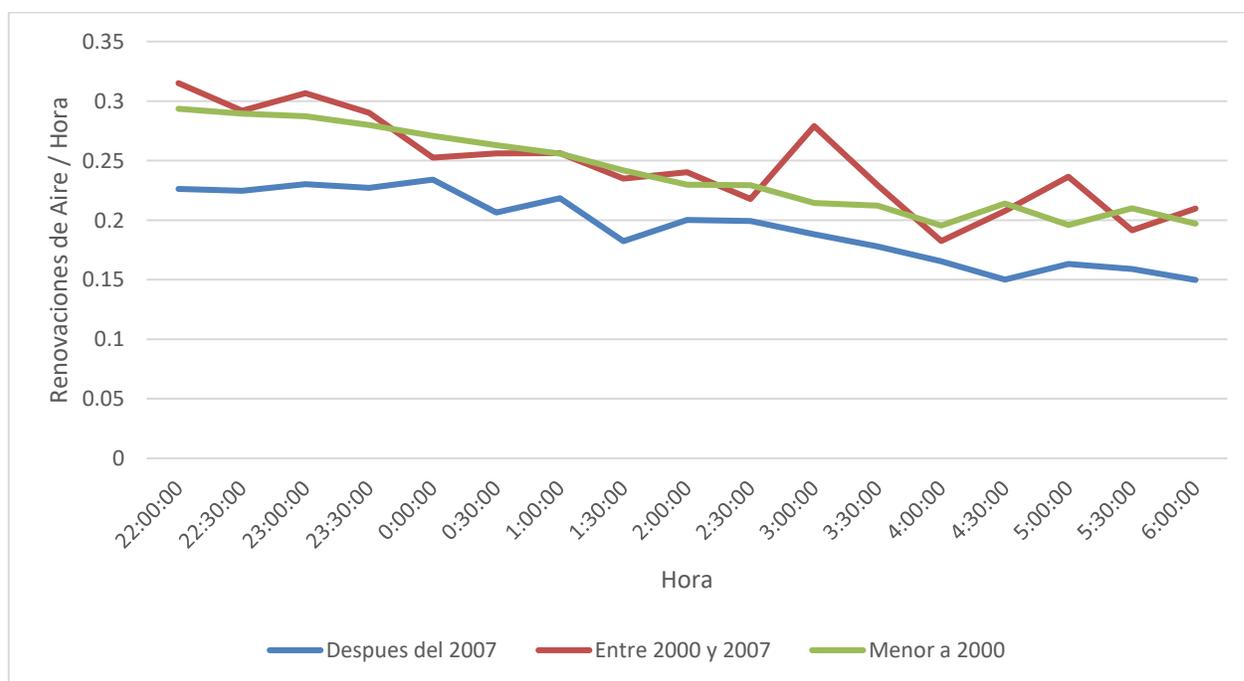


Figura 7-16: Curvas de renovaciones de aire en horario nocturno según año de construcción de vivienda.

Las viviendas construidas después del año 2007, cuando la reglamentación implementa las restricciones de transmitancia en muros y pisos y limita la proporción de ventanas respecto a la envolvente de las edificaciones, presentan menores tasas de infiltraciones promedio que las que han sido construidas en rangos anteriores. En tanto, las viviendas construidas antes del año 2000 y en el periodo 2000-2007 presentan tasas de infiltración similares. Sin embargo, la curva del rango 2000-2007

presenta una alta dispersión de datos, presentando un peak fuera de lo esperado a las 3:00 y otro a las 5:00, período que no es considerado para la media de infiltraciones.

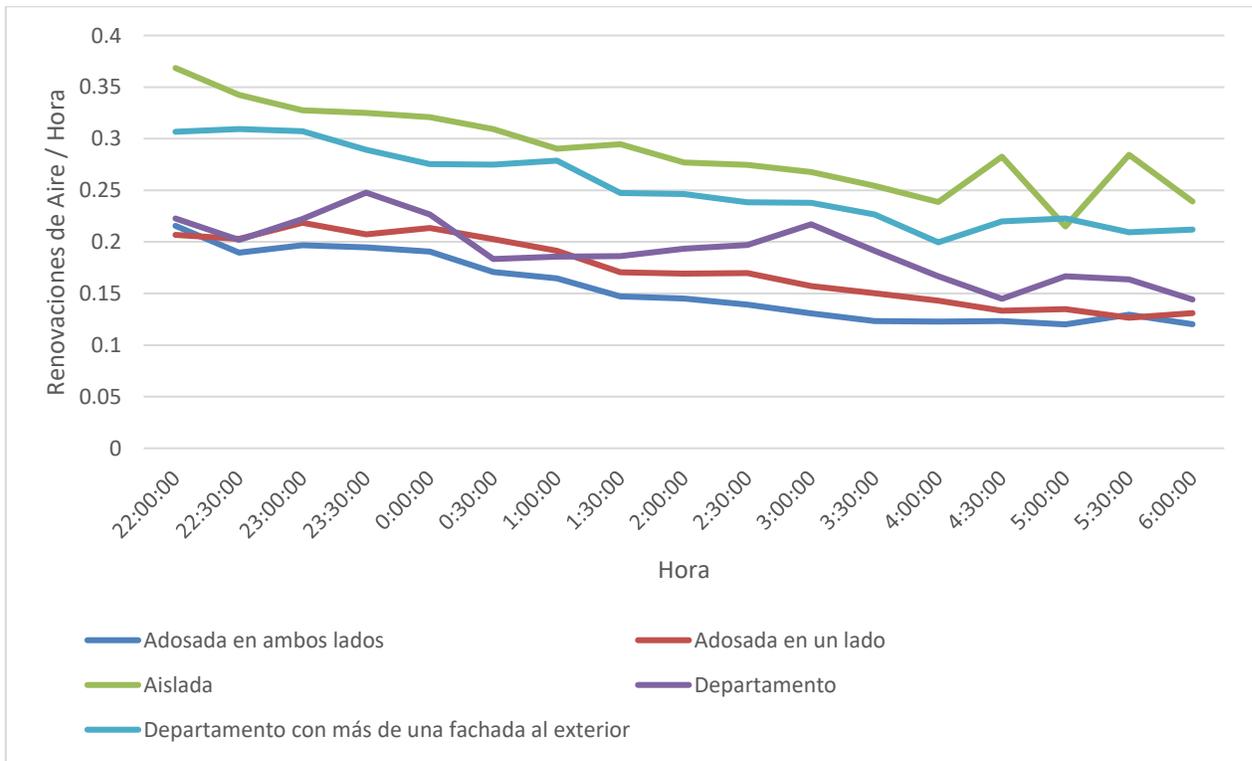
En tanto, las viviendas construidas antes del 2007 presentan curvas de renovación más suaves que los otros grupos y en todo el rango horario se observan que la tasa de infiltración promedio es menor

Esto da un cierto énfasis en que el efecto de limitar la transmitancia de las soluciones constructivas de la envolvente sí podría tener un efecto indirecto en disminuir las infiltraciones de una vivienda. Sin embargo, también se debe considerar que otro motivo de esta implicancia se podría deber a que a medida que han avanzado los años, la industria de la construcción debiese tender a mejorar sus estándares de calidad por el cual se disminuirían las grietas provocadas en el proceso constructivo y orificios en juntas o cambios de material.

### 7.3.3 TIPO DE AGRUPACIÓN

**Tabla 7-XI: Renovaciones según tipo de agrupación de vivienda.**

Tipo de agrupación	Cantidad de viviendas		RAH		
	Frecuencia porcentual	Conteo	Media	Máximo	Desviación Estándar
Adosada en ambos lados	8,62%	10	0,29	0,58	0,20
Adosada en un lado	11,21%	13	0,30	0,75	0,20
Aislada	10,34%	12	0,51	1,56	0,36
Departamento	14,66%	17	0,32	1,43	0,37
Departamento con más de una fachada al exterior	55,17%	64	0,44	1,79	0,40



**Figura 7-17: Curvas de renovaciones de aire en horario nocturno según tipo de agrupación de vivienda.**

Más de la mitad de las viviendas de la muestra corresponden a departamentos con más de una fachada hacia el exterior, usualmente característicos de departamentos ubicados en las esquinas de edificios. Estos presentan una mayor tasa de renovaciones que los departamentos con solo una fachada.

En las agrupaciones correspondientes a casas, las casas aisladas presentan una mayor tasa de renovación, con 0,51 [Ren/hora]; seguidas de las adosadas a un lado, con 0,30 [Ren/hora]; y finalmente las casas que presentan una menor tasa son las adosadas a ambos lados, con 0,29 [Ren/hora]. En tanto, los departamentos con una fachada y más de una fachada hacia el exterior presentan tasas de 0,32 y 0,44 [Ren/hora]; respetivamente.

Si los tipos de agrupación son divididos en dos grupos generales definidos por casas y departamentos, en cada uno se presentan resultados esperados; ya que a medida que aumentan las superficies de la envolvente que dan hacia el exterior la tasa promedio de infiltraciones es mayor en ambos casos. Sin embargo, no se identifica que la tasa de renovaciones de aire sea mayor en viviendas que en departamentos. Es de esperar que las casas en cualquier tipo de agrupación presentasen mayores tasas de infiltración, ya que usualmente tienen un mayor número de superficies perimetrales en contacto con el exterior respecto a los departamentos

Probablemente no se evidencia una diferencia marcada entre casas y departamentos, porque los módulos de datos sólo registran las variables locales en una habitación y no son generales a la vivienda. En este sentido el número de muros exteriores

debiese ser un factor de mayor importancia por el número proporcional de aberturas que permitan la entrada de aire y el mayor grado de exposición a ráfagas de viento.

### 7.3.4 NIVEL SOCIOECONÓMICO (NSE)

Tabla 7-XII: Renovaciones según Nivel Socioeconómico de familia habitante.

NSE	Cantidad de viviendas		RAH		
	Frecuencia porcentual	Conteo	Media	Máximo	Desviación Estándar
Alto	29,31%	34	0,31	0,98	0,32
Medio	37,93%	44	0,43	1,79	0,43
Bajo	32,76%	38	0,45	1,56	0,32

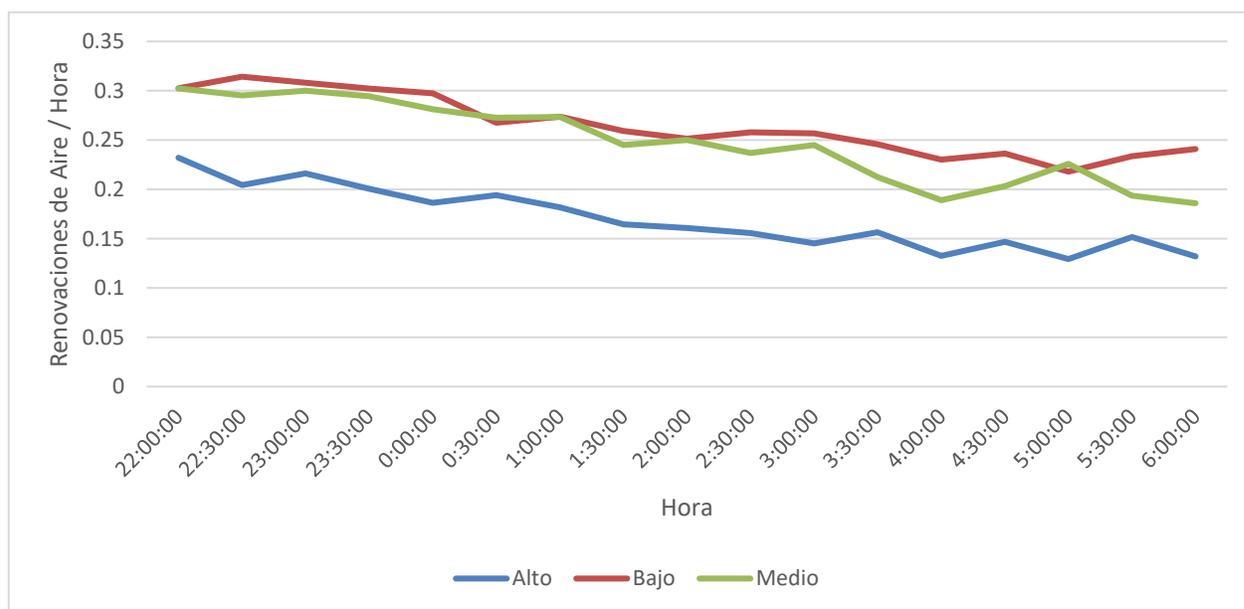


Figura 7-18: Curvas de renovaciones de aire en horario nocturno según NSE de familia habitante.

Los tres Niveles Socioeconómicos distribuyen de manera casi homogénea en el número de viviendas acotada a Santiago y las tasas de renovaciones de aire promedio muestran mejores niveles de estanqueidad el NSE alto con una tasa de renovaciones promedio de 0,31 [Ren/hora]. En tanto, los segmentos medio y bajo; muestran una media de 0,43 y 0,45 [Ren/hora].

Un argumento directo sería que las familias de NSE más alto pueden alcanzar viviendas de mejor calidad e indirectamente más estancas, por medio de procesos constructivos mejor calificados en sellos y juntas de materiales, puestas y ventanas. Sin embargo, no se presenta una diferencia considerable entre los niveles medio y bajo, donde puede que no exista diferencia tal en la calidad de las viviendas.

### 7.3.5 TIPO DE VENTANAS

Tabla 7-XIII: Renovaciones según Tipo de ventana en envoltorio de vivienda.

Tipo de ventanas	Cantidad de viviendas		RAH		
	Frecuencia porcentual	Conteo	Media	Máximo	Desviación Estándar
Doble vidrio	22,41%	26	0,34	0,98	0,35
Vidrio simple	61,21%	71	0,45	1,79	0,39
Sin datos	16,38%	19	0,31	1,56	0,24

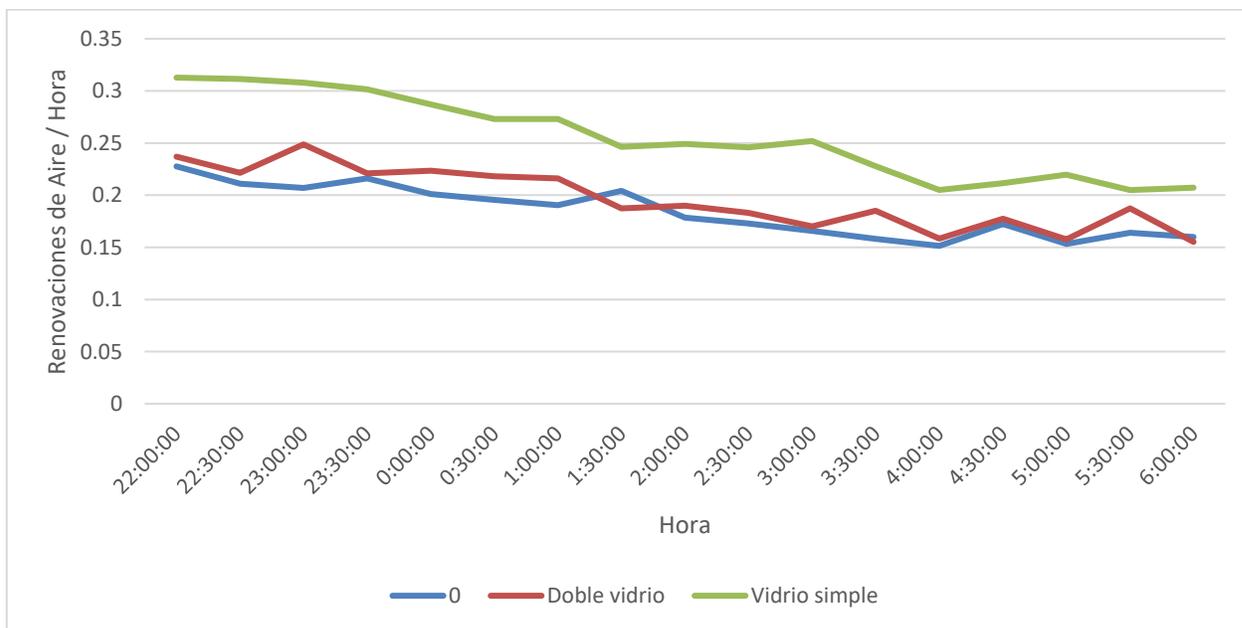


Figura 7-19: Curvas de renovaciones de aire en horario nocturno según tipo de vidrio en ventanas de vivienda.

Del análisis de esta perspectiva se obtiene que las viviendas con ventanas del tipo vidrio simple promedian una tasa de renovaciones de 0,45 [Ren/hora] mientras que en las de tipo Doble vidrio es de 0,34 [Ren/hora]. Más de la mitad de las ventanas, alrededor del 60% de la muestra, corresponden a ventanas del tipo vidrio simple, mientras que las de tipo Doble vidrio corresponden a un poco más del 20%.

Las viviendas en las cuales no se cuenta con datos del tipo de ventanas por encuesta inicial presentan una tasa promedio de renovaciones de 0,31 [Ren/hora], menores a las ventanas de doble vidrio. Visualizando el comportamiento de la curva sin datos en la Figura 7-19, este se acopla de buena manera a la curva de ventanas tipo Doble vidrio, por lo que sería de esperar que dentro de este grupo exista un importante número de viviendas con este tipo de ventanas.

## 7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 7.4.1 HUMEDAD ABSOLUTA

Al calcular la humedad absoluta a partir de los registros de la Muestra 2 y 3 se tiene un promedio cercano a los 9 [g/m<sup>3</sup>] con una desviación de 1,5 [g/m<sup>3</sup>] según las mediciones internas de las viviendas, y una media de 7,2 [g/m<sup>3</sup>] con desviación de 1,2 [g/m<sup>3</sup>] acorde a las mediciones externas (ver Tabla 7-III).

Luego, se diferencian los comportamientos promedios de HA interior y exterior a lo largo del día. Mientras la HA exterior se comporta de acuerdo a la distribución de temperatura diaria, la curva de HA interior responde a la utilización de la vivienda en su horario activo, al menos en los meses donde se acota la Muestra 2 y 3.

Observando la gráfica de la Figura 7-9 se tiene que el valle de la curva  $\Delta HA$ , que representa la diferencia entre la humedad absoluta interna y externa, sucede alrededor del mediodía y el peak se presenta a las 10:30pm.

La humedad absoluta interior media presenta su punto de mayor aumento a las 7:00pm. Esto probablemente se debe a que es cuando comienza el *horario activo* de la vivienda, es decir, cuando los ocupantes se encuentran regularmente en esta después de sus actividades laborales diarias. En este horario comienzan las actividades domésticas al interior de la vivienda, por lo que no es de sorprender que la humedad absoluta interior tienda a aumentar, debido al mayor uso artefactos de cocina, baños y la misma respiración de las personas. Además, como el análisis es realizado en los meses de invierno, es probable que exista una contribución de cargas internas de humedad que tiene como fuente los aparatos de calefacción a combustión.

Debido a esto, es que se justifica el acotar el análisis de infiltraciones de aire a un horario comprendido entre las 10:00pm y 6:00am, cuando el decaimiento promedio de HA interior retoma a un valle local de la curva y posteriormente utilizar la primera sección de la curva, entre las 10:00 y 00:00 horas, para obtener un valor único que represente la tasa de infiltración del día. Adicionalmente, el horario acotado para el análisis permite prevenir una excesiva apertura de puertas y ventanas, ya que corresponde a un horario nocturno durante el cual bajan las actividades domésticas de las personas y, como se observa en la Figura 7-9, la humedad es menos variable que durante el día.

### 7.4.2 INFILTRACIONES DE AIRE

Al analizar las infiltraciones de forma global, estas presentan un comportamiento poco homogéneo al calcular tasas de renovación en viviendas particulares. Esto es debido a las altas dispersiones provenientes de la diferencia de humedades interiores  $\Delta HA_{int}$  entre los lapsus de registros y diferencias de humedades  $\Delta HA$  entre interior y exterior de la vivienda.

Al observar la tasa de renovaciones en la curva de la Figura 7-14, esta da cuenta de que los mayores valores de RAH se obtienen en un principio de la curva, comenzando el horario de análisis y coincidiendo con la mayor pendiente entre registros de la curva

de HA interior. El comportamiento es esperable, ya que en un principio la cantidad de vapor de agua se encuentra en sus niveles más altos y ejerce una mayor presión. Después la concentración decae para estabilizarse.

A partir de las 4:00am la curva tiende a experimentar un comportamiento constante, por lo que el horario acotado para el análisis parece ser adecuado para visualizar el comportamiento de las infiltraciones.

Finalmente, en la Tabla 7-VIII se observa que al desplegar los valores de RAH por hora siguen existiendo altos valores en la desviación estándar que varían al evaluar las viviendas individualmente, pero no en magnitudes considerables. Al no generarse la misma cantidad de vapor de agua diario por cada vivienda y sumado a las distintas condiciones meteorológicas que se tienen localmente, la metodología muestra resultados que son poco constantes en el día a día.

Como factor principal meteorológico se tiene al viento, ya que altera considerablemente el diferencial de presiones y varía la densidad del aire. A pesar de que se toman las precauciones para evaluar meses en los que se experimentan bajas velocidades de viento en la región metropolitana, las mediciones tomadas corresponden a velocidades de ráfaga y no necesariamente reflejan el comportamiento en las proximidades de cada vivienda.

Por otro lado, en la metodología no se consideran las pérdidas de vapor de agua por condensaciones y absorción higroscópica de los materiales. En la práctica, se desconoce la real importancia que toma este factor en los resultados obtenidos.

#### *7.4.3 ANÁLISIS DE PERSPECTIVAS*

Al dividir la muestra de viviendas según las perspectivas de análisis escogidas, se tiene que, si bien algunas propiedades muestran resultados según la lógica esperada, existen ciertas dificultades para aislar la perspectiva en análisis de la influencia del resto de las propiedades de la vivienda. Adicionalmente, el número de viviendas no resulta ser tan homogéneo en algunos grupos de perspectiva, por lo que la muestra podría no considerarse tan representativa en esos casos.

Según el análisis de características se puede resumir lo siguiente:

- Materialidad:  
Las viviendas con muros de adobe presentan menores tasas promedio de infiltraciones, pero sólo hay cinco viviendas con esta materialidad en la muestra de Santiago. Entre estas cinco viviendas existe una heterogeneidad en sus demás propiedades, donde se destacan dos viviendas donde su construcción data después del año 2007 y otras tres construidas antes del 2000; familias residentes distribuidas en los tres NSE y tres viviendas con ventanas tipo vidrios simple y dos con doble vidrio. Esto muestra que no necesariamente la baja tasa de infiltraciones responde en función a otras propiedades analizadas y los muros de adobe podrían ser efectivamente bastante estancos.

Como se mencionó anteriormente, en el adobe podría generarse una absorción higroscópica sin el tratamiento adecuado. Luego, se desconoce si en las

viviendas analizadas se generan pérdidas considerables que alteren los resultados.

Por otro lado, era de esperar que se obtuvieran mayores infiltraciones medias en viviendas de muro liviano, donde las infiltraciones además de producirse a través de sellos y juntas se podrían efectuar a través de los mismos muros, los cuales normalmente no cuentan con un diseño estratégico para prevenir las fugas de aire.

- Año de construcción:  
Las viviendas construidas desde el año 2007 presentan menores tasas de infiltración con respecto a las construidas antes. Lo obtenido se pueden deber a la influencia indirecta de la reglamentación térmica impuesta en el país o a mejoras constructivas a favor de la estanqueidad que se hayan desarrollado en el paso de los años. Sin embargo, no se tiene conocimiento de esto último.

Contrastando con los otros dos rangos de año de construcción, ambos presentan medias de infiltraciones parecidas, y para el caso de las viviendas construidas entre el año 2000 y 2007, además de no tener un gran número de viviendas en la muestra, se observa que su curva de infiltraciones es bastante heterogénea, lo que indica que existe una gran dispersión en las renovaciones de aire obtenidas por vivienda.

Siguiendo esto, puede que más que un factor de avance en la calidad de construcción de vivienda, las menores infiltraciones de aire obtenidas en viviendas construidas desde el 2007 debiese estar ligado a la implementación de la reglamentación térmica en su segunda etapa.

- Tipo de vivienda:  
Como se explica anteriormente, de la metodología se obtienen tasas de renovación referentes a espacios locales dentro de la vivienda, donde están ubicados los módulos de ReNaM, por lo que no necesariamente los resultados se relacionen directamente a las características propias de la envolvente a nivel general de la vivienda.

De igual manera, los resultados muestran que las viviendas con un mayor número de fachadas hacia el exterior, referente al segundo tipo de departamentos y casas aisladas, presentan una mayor tasa de renovaciones de aire. Que no se presente una mayor tasa de renovaciones en casas que en departamentos se puede deber a que, en contraste, los departamentos en altura son más susceptibles a la influencia del viento, por lo que el efecto de estas presiones podría sumar ciertas distorsiones a la metodología de cálculo.

- NSE:  
Si bien el nivel socioeconómico de la familia habitante no es una característica propiamente física de la vivienda, si puede esconder la calidad de construcción

que presenta esta; así como los niveles de estanqueidad en sus sellos de puertas y ventanas.

Bajo esto, existe una notoria diferencia entre las tasas de renovación existentes para las familias de NSE alto respecto a los grupos restantes, donde estas últimas presentan tasas de renovación un 50% mayores que las de segmento alto. Como factor adicional, la muestra de viviendas con NSE alto casi no presenta estructuraciones de muros livianos, por lo que la baja tasa de renovaciones podría verse influenciada por esta propiedad.

Con los datos que se tienen, realizar un análisis más profundo sería bastante cuestionable, ya que no se tiene la certeza acerca de qué otras propiedades físicas se ven afectadas en viviendas al alcance de familias de altos ingresos.

- Tipo de ventanas:

Lamentablemente para esta perspectiva se tiene 19 viviendas sin datos del tipo de vidrio presentes en sus ventanas, entre las que promedian una baja tasa de infiltraciones.

Descartando estas viviendas sin datos, se tiene que existe una clara diferencia entre lo obtenido para ventanas con vidrio simple respecto a las de doble vidrio, donde las de doble vidrio presentan una menor tasa de renovaciones de aire.

Más que el efecto mismo del tipo de vidrio es probable que el factor influyente en las infiltraciones sea la estanqueidad de los marcos y sellos de las ventanas. Mientras que para la instalación de vidrios simples puede que no se tome ninguna consideración especial para el marco y juntas, para instalar un Doble Vidrio Hermético (DVH) probablemente se consideren marcos con rotura de puente térmico y sellos de mejor calidad.

## 8 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

La metodología implementada para analizar y cuantificar las infiltraciones de aire corresponde al método del gas trazador según decaimiento del vapor de agua y utiliza los registros de las viviendas monitoreadas por la ReNaM. Para llegar a la humedad absoluta se utiliza la siguiente relación psicométrica:

$$HA = \frac{13,25304}{273,15 + T} \cdot 10^{\frac{7,591386 \cdot T}{T+240,7263}} \cdot HR$$

Luego, para cuantificar las renovaciones de aire según los registros de viviendas se utiliza la ecuación:

$$RAH(t) = \frac{1}{\Delta t} \cdot \ln \left( \frac{HA_{int}(t) - HA_{ext}(t-1)}{HA_{ext}(t) - HA_{int}(t)} \right)$$

Donde  $\Delta t$  es igual al intervalo de tiempo que se tiene configurado en la base de datos de la red, igual a 30 minutos.

Del análisis propuesto se consideraron ciertas limitaciones que dificultan la aplicación de la metodología y que podrían proveer de errores en el cálculo. Entre las más importantes se encuentran:

1. La metodología del gas trazador, estandarizada en la norma ASTM E741, establece que el gas en cuestión debe ser homogenizado en la habitación a ensayar, de manera de tener iguales concentraciones del gas al interior de la envolvente. Esto es difícil de realizar en las viviendas monitoreadas, ya que como cargas internas de vapor de agua se utilizan las propias de una vivienda habitada, tales como: respiración y transpiración de la actividad humana, uso de calefacción, utilización de mecheros y otros equipos en cocina, vapor de agua proveniente de baños, etc. Con esto, no es posible establecer una total homogeneidad del vapor de agua y los datos utilizados son los medidos por los módulos ubicados en lugares puntuales de la vivienda. Por otro lado, la cantidad de vapor de agua emitida por las fuentes internas puede no ser suficiente para lograr una curva de decaimiento que perdure en los periodos de registro, iguales a treinta minutos.
2. Sumado al punto anterior, tiempos de registro cada treinta minutos no son óptimos para aplicar la metodología, ya que puede no ser lo suficientemente reducido para captar la curva exponencial de decaimiento de concentración.
3. No se tiene una real claridad sobre la influencia ejercida por presiones de viento sobre la envolvente y otros factores externos anexos al intercambio exclusivo de aire con el exterior, como son las condensaciones intersticiales y absorción higroscópica de los materiales que conforman la envolvente de la vivienda.
4. Alteraciones en la envolvente que varíen las superficies de aberturas. En este caso no se puede tener un control exhaustivo respecto a la apertura de puertas y ventanas.

Producto de estas limitaciones se toman ciertas consideraciones para evaluar los registros de la base de datos ReNaM:

- Acotar la muestra a la ciudad de Santiago en los meses de invierno, entre mayo y agosto del 2017, con el fin de utilizar registros en fechas donde no existen grandes ráfagas de viento.
- Acotar horario de análisis entre 22:00 horas y 06:00am; ya que, en promedio, al inicio de este rango es cuando existe una cantidad mayor de vapor de agua acumulado al interior de las viviendas. Además, durante este horario no existe una variación tan grande de HR exterior respecto al día y se intuye que es menos probable la abertura de puertas y ventanas debido a que los ocupantes duermen.
- Limitar los registros utilizados para el cálculo de infiltraciones según que cumplan las condiciones teóricas de humedad absoluta interior necesarias para emplear la metodología del gas trazador.

De la metodología de cálculo de infiltraciones y resultados globales asociados se concluye lo siguiente:

- La ecuación y metodología utilizada para el cálculo de infiltraciones de aire se comporta de acuerdo con lo esperado en el sentido de considerar los cambios de concentración de vapor de agua al interior de las viviendas y la diferencia de concentración en el interior y exterior como variables independientes. En ese sentido, no existe una mayor dificultad en aplicar la metodología usando como entradas los registros que ReNaM provee, siempre cuando presenten mediciones no viciadas e inalteradas por factores externos como soleamiento o la exposición a fuentes directas de calor y humedad.
- El cálculo de infiltraciones en sí trae asociado un error numérico bastante grande si se quisiera llegar a un valor característico por vivienda. Este error proviene en primera instancia de las dificultades de establecer una HA interior suficiente para que posteriormente la concentración de vapor de agua entre en régimen de decaimiento prolongado. De igual manera, al evaluar globalmente los promedios de HA y RAH según el rango horario definido, las curvas tienden a desarrollar el decaimiento esperado y reflejar las renovaciones de aire a través del tiempo.
- De escoger un valor característico de RAH por horario de análisis, se debiese tomar el cálculo obtenido cuando la pendiente de decaimiento de HA interior es mayor, con el fin de que se asimile a la variación teórica de concentración, correspondiente a una curva logarítmica. Usualmente, en la mayoría de los días analizados por la muestra, la mayor pendiente negativa ocurre entre las 22:00 y 00:00 horas, por lo que es el horario óptimo para cuantificar las infiltraciones
- Se verifica que la toma de datos cada treinta minutos no parece ser un lapsus suficiente de tiempo para observar las posibles variaciones de concentración que existen al interior de las viviendas. En ese rango de tiempo se podrían generar ganancias aisladas de vapor de agua o pérdidas excesivas que no se ven reflejadas en la diferencia de humedad absoluta. Por otro lado, es difícil identificar un real comportamiento exponencial en la curva de decaimiento.

Luego de analizar el método de cálculo, se aplicó diferenciando las viviendas según distintas perspectivas de análisis. De estas, se destaca lo siguiente:

- En la materialidad de muros, se observa que viviendas con muros de estructura liviana tienden a generar una mayor tasa de infiltraciones que sus pares de mayor masa.
- Se observan menores tasas de renovación en viviendas construidas después del año 2007, cuando se comienza a aplicar la segunda etapa de la reglamentación térmica, por lo que indirectamente sí influiría en promover edificaciones más estancas.
- Las casas aisladas y departamentos con más de una fachada hacia el exterior tienen mayores tasas de renovación que las viviendas pareadas o departamentos de una fachada. Esto se explica, ya que mientras exista una mayor cantidad de muros hacia el exterior, mayor es la cantidad de posibles grietas y sellos por donde se generen entradas de aire
- Las viviendas de familias de nivel socioeconómico alto tienden a ser más estancas que las viviendas de familias de menores recursos y clase media. Esto probablemente radica en que la calidad de construcción a la que pueden aspirar las familias de mayores ingresos es más alta y, al menos en la muestra utilizada, no presenta viviendas de estructuración liviana.
- Se observa que las viviendas con ventanas tipo vidrio simple presentan mayores tasas de renovación que las ventanas con doble vidrio, probablemente influenciadas por la estancas de sus marcos.

En los resultados expuestos, la metodología muestra resultados de baja confiabilidad al comparar la tasa calculada para distintos días. En efecto, para desarrollar el método a una mayor precisión en el cálculo de infiltraciones de aire, se podría implementar en la ReNaM u otro SMVA una serie de consideraciones tales como reducir el tiempo de medición de variables, agregar módulos anemómetros al sistema de monitoreo y generar una mejor caracterización tanto de la edificación como de la familia residente.

Por otro lado, día a día la ReNaM va enriqueciendo su base de datos y se espera que posterior a este estudio se realicen nuevas investigaciones en las ciudades y viviendas restantes que no han sido evaluadas. Adicionalmente, otros gases trazadores se podrían evaluar en la metodología, como es el caso del dióxido de carbono, el cual ya es medurado al interior de las viviendas de la ReNaM.

La gran ventaja de continuar el estudio de metodologías en base a SMVA es que se logran conocer las condiciones de habitabilidad de los recintos sin la necesidad de intervenir los locales para cuantificar la tasa de renovación, como es en este caso, además de proveer de una gran base de datos que permita investigar el confort de las personas e incentivar el autocontrol en pos de un ambiente sano y comfortable.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Cancino, G. J. M. (2016). *Factibilidad de una nueva metodología experimental para el cálculo de infiltraciones en una envolvente térmica, alternativa al método de presurización del ventilador*. Universidad de Chile.
- CITEC UBB. (2013). *Manual de hermeticidad al aire de edificaciones*. *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Construcción, I. D. La. (2006). *Manual de aplicación Reglamentación térmica*.
- Cooperación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción. (2008). *Aislación térmica exterior. Manual de diseño para soluciones en edificaciones*.
- Díaz Anguita, J. R. (2017). Comportamiento térmico de viviendas por efecto invernadero del vidrio en verano.
- International, A. S. for T. and M. (2011). ASTM E 741 Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a. *Astm International*, 00(2006), 1–18. <https://doi.org/10.1520/E0741-11>. Copyright
- Madrid, H., Opazo, F., & Parada, O. (2012). Impacto de las infiltraciones de aire en el desempeño energético y térmico de las viviendas. Retrieved from <http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=63&edi=3&xit=impacto-de-las-infiltraciones-de-aire-en-el-desempeno-energetico-y-termico-de-las-viviendas>
- Martín Monroy, M. (2006). *Manual del aire*.
- Martín Monroy, M. (2010). *ICARO - Manual del calor*. Dca Ulpqc.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (n.d.). Calificación energética. Retrieved from <http://www.calificacionenergetica.cl/>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2013). *Estrategia Nacional de Construcción Sustentable*. Santiago. Retrieved from <http://csustentable.minvu.gob.cl/item/estrategia-nacional-de-cs/>
- Navarrete, S. (2016). Infiltraciones de Aire en la Vivienda.
- NCh432.Of71 Ministerio de Obras Públicas. (1971). Cálculo de la acción del viento sobre las construcciones, 41.
- Netatmo Smart Home Weather Station. (n.d.). Retrieved from <https://www.netatmo.com/en-GB/product/weather/>
- Ossio, F., De Herde, A., & Veas, L. (2012). Exigencias europeas para infiltraciones de aire: Lecciones para Chile. *Revista de La Construcción*, 11(1), 54–63. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2012000100006>
- Palma, J. D. (2017). *Red nacional de monitoreo, Análisis de datos*.

- Patel, T., Mitsingas, C., Miller, J. P., & Newell, T. A. (2011). Comparison of Blower Door and Tracer Gas Testing Methods for Determination of Air Infiltration Rates Through Building Envelopes at Normal Operating Conditions. *ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability, Parts A, B, and C*, (January), 1013–1019. <https://doi.org/10.1115/ES2011-54373>
- Urra, B. M. (2013). *Análisis y medición del nivel de infiltración de aire y puentes térmicos en espacios de oficina*. Universidad de Chile.

# 10 ANEXOS

## 10.1 ANEXO 1: ESPECIFICACIONES DE MÓDULO NETATMO SIZE

Indoor module: 45x45x155 mm / 1.8x1.8x6 inches

Outdoor module: 45x45x105 mm / 1.8x1.8x4.1 inches

### MECHANICS & DESIGN

Single piece of durable aluminum shell. UV-resistant.

### SENSORS AND MEASUREMENTS

Temperature (indoor):

Ranges from: 0°C to 50°C / 32°F to 112°F

Accuracy:  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  /  $\pm 0.54^{\circ}\text{F}$

Temperature (outdoor):

Ranges from: -40°C to 65°C / -40°F to 150°F

Accuracy:  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  /  $\pm 0.54^{\circ}\text{F}$

Humidity (indoor and outdoor):

Ranges from: 0 to 100%

Accuracy:  $\pm 3\%$

Barometer:

Ranges from: 260 to 1160 mbar / 7.7 to 37.2 inHg

Accuracy:  $\pm 1$  mbar /  $\pm 0.03$  inHg

CO2 meter (indoor):

Ranges from: 0 to 5000 ppm

Accuracy:  $\pm 50$  ppm or  $\pm 5\%$

Sound meter:

Ranges from: 35 dB to 120 dB

#### UNITS

US system: °F and inHg.

Metric system: °C and mbar.

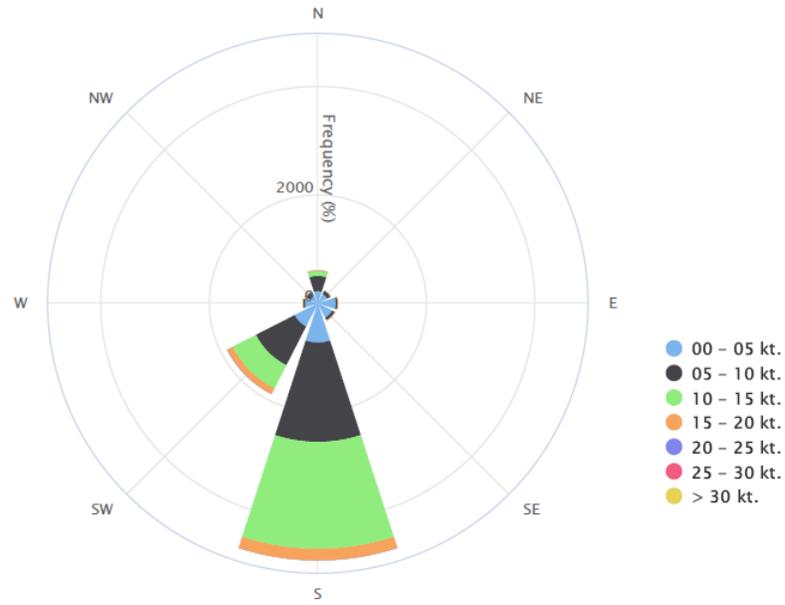
#### CLOUD DATA STORAGE

Available from multiple devices, no storage limit.

Record frequency: every 5 minutes.

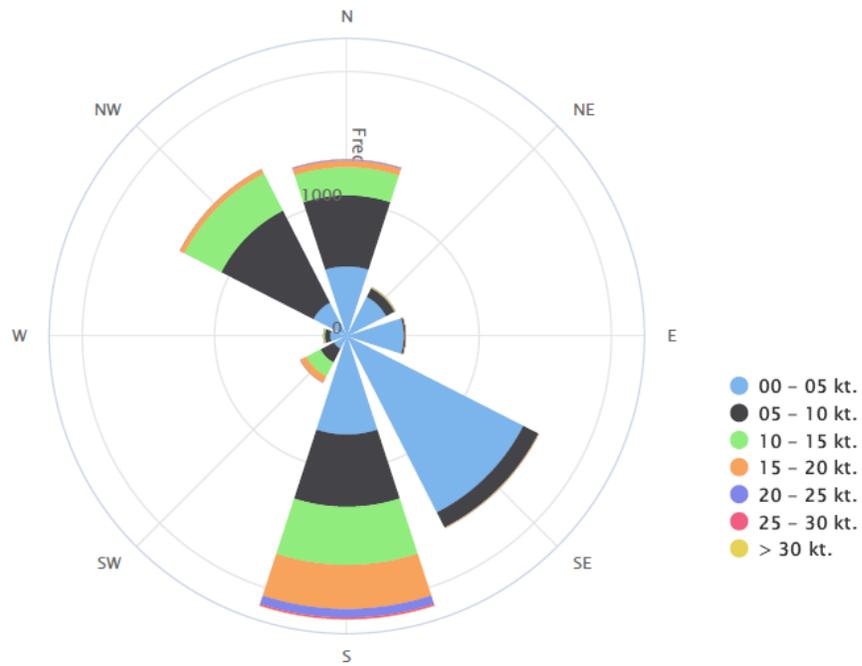
## 10.2 ANEXO 2: INFORMES DE VIENTO PREDOMINANTE ANUAL (2017)

### 10.2.1 ANTOFAGASTA, ESTACIÓN CERRO MORENO



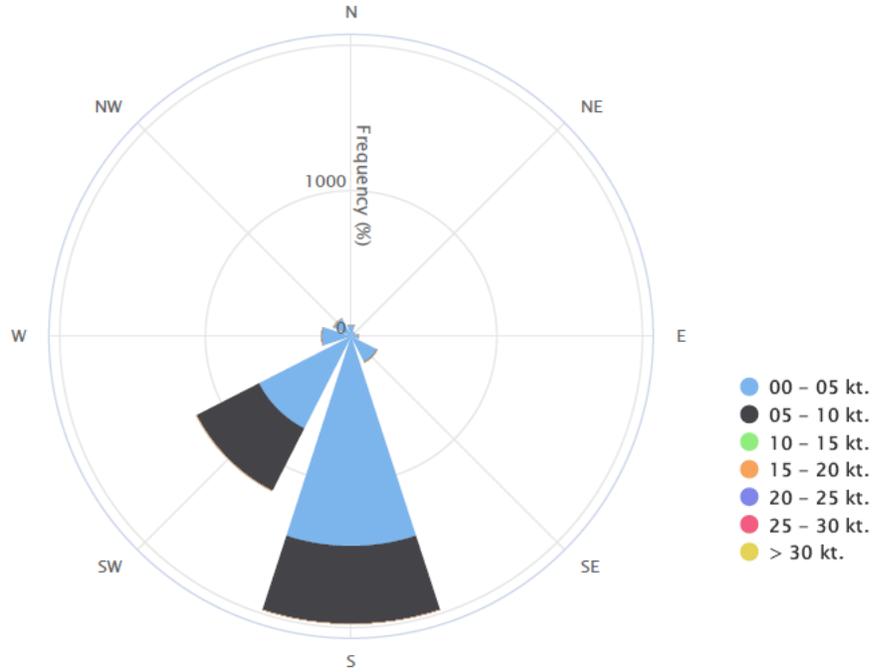
Resumen Mensual												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Todas Las Horas	S/9	S/9	S/9	S/8	S/8	S/8	S/8	S/9	S/9	S/10	S/9	S/9
12 UTC	SW/4	SE/2	E/2	SE/2	SE/4	E/4	S/6	S/7	S/7	SW/6	SW/5	S/5
18 UTC	S/13	S/13	S/12	S/11	S/11	S/10	S/10	S/11	S/13	S/13	S/13	S/13
00 UTC	S/8	S/7	S/7	S/7	S/7	S/7	S/8	S/8	S/9	S/10	S/8	S/9
121800 UTC	S/10	S/9	S/9	S/9	S/9	S/8	S/8	S/9	S/10	S/10	S/10	S/10

10.2.2 VALPARAÍSO, ESTACIÓN RODELILLO



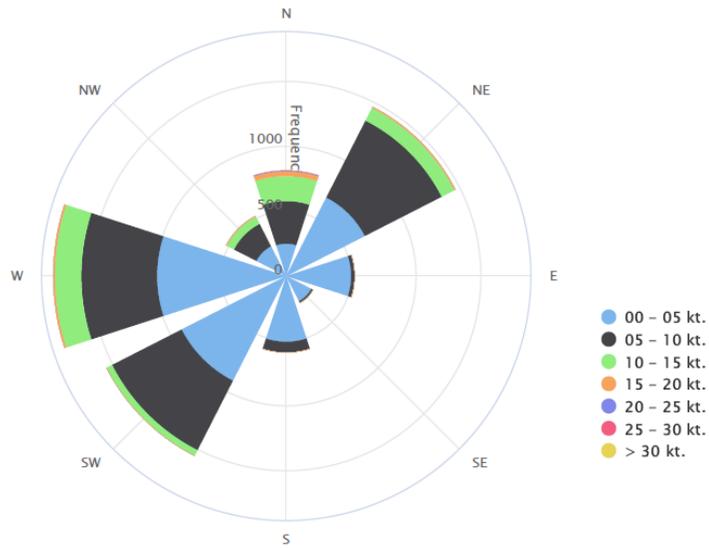
Resumen Mensual												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Todas Las Horas	S/10	NW/8	S/8	S/8	N/6	N/7	SE/2	S/6	S/10	S/9	S/9	NW/8
12 UTC	CALMA	S/6	CALMA	S/6	SE/2	SE/2	SE/2	S/5	S/6	S/8	S/6	NW/5
18 UTC	NW/10	NW/11	N/10	NW/7	N/7	S/9	S/9	NW/7	S/13	S/13	NW/8	NW/10
00 UTC	S/12	S/9	SE/3	SE/4	SE/2	SE/3	SE/2	SE/2	SE/3	SE/4	S/6	S/13
121800 UTC	S/12	NW/9	S/7	S/9	N/6	SE/3	SE/2	N/6	S/8	S/10	S/8	NW/8

10.2.3 SANTIAGO, ESTACIÓN QUINTA NORMAL



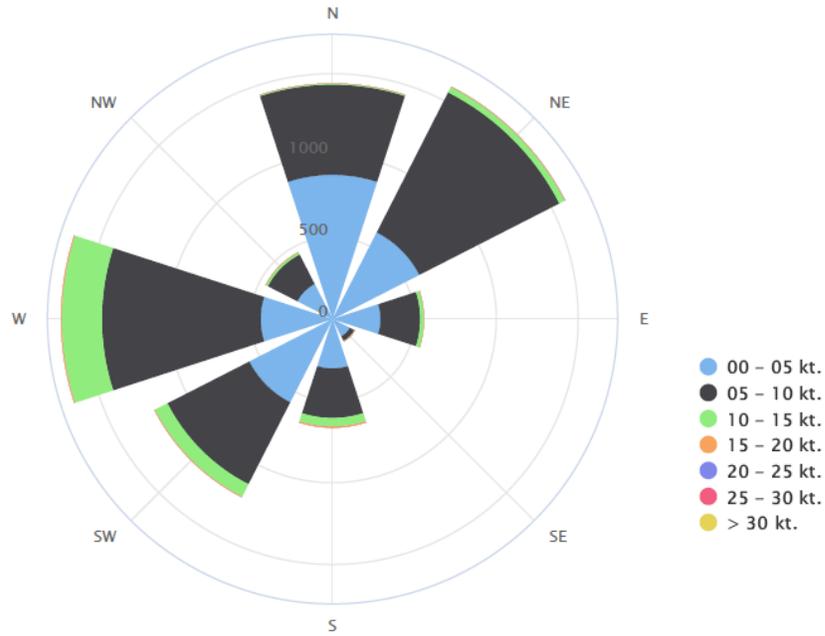
Resumen Mensual												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Todas Las Horas	CALMA											
12 UTC	CALMA											
18 UTC	SW/5	SW/5	S/4	S/4	CALMA	CALMA	CALMA	S/3	SW/4	SW/4	S/5	S/6
00 UTC	S/4	S/4	S/4	CALMA	CALMA	CALMA	CALMA	CALMA	S/3	S/3	S/4	S/4
121800 UTC	S/4	S/4	S/4	CALMA	CALMA	CALMA	CALMA	CALMA	CALMA	S/4	S/4	S/4

10.2.4 TEMUCO, ESTACIÓN MAQUEHUE



Resumen Mensual												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Todas Las Horas	SW/5	W/5	W/4	NE/5	NE/6	NE/6	NE/5	NE/6	SW/3	W/6	W/5	W/6
12 UTC	W/3	W/3	NE/4	NE/6	NE/6	NE/5	NE/6	NE/5	NE/4	NE/6	W/3	SW/3
18 UTC	SW/6	W/6	SW/4	W/5	W/4	NE/7	S/3	W/8	SW/5	W/8	SW/5	SW/6
00 UTC	SW/5	W/7	W/4	SW/2	NE/5	N/7	W/4	NE/5	SW/3	W/5	W/7	SW/4
121800 UTC	SW/5	W/5	W/4	NE/5	NE/6	NE/6	NE/4	NE/6	SW/4	W/6	W/6	SW/5

10.2.5 COYHAIQUE, ESTACIÓN TENIENTE VIDAL



Resumen Mensual												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Todas Las Horas	W/7	W/6	N/4	N/4	NE/5	NE/5	NE/6	N/4	W/6	NE/5	W/7	W/7
12 UTC	NE/6	NE/6	NE/5	NE/5	N/5	N/4	NE/5	N/5	N/5	NE/6	NE/4	W/7
18 UTC	W/8	W/8	S/6	S/5	SW/4	N/5	NE/6	SW/5	SW/7	W/7	W/8	W/9
00 UTC	W/6	W/6	N/3	N/4	N/5	CALMA	NE/7	SW/4	N/4	W/4	W/6	W/7
121800 UTC	W/7	W/7	N/4	N/4	N/5	N/4	NE/6	SW/4	W/7	W/6	W/7	W/8

## 10.3 ANEXO 3: INFORMES SOLARIMÉTRICOS

### 10.3.1 INFORME QUINTA NORMAL, MES DE JUNIO

WMO  
Total radiation (sun and sky) T,MJ/m<sup>2</sup>  
Duration of sunshine ss, hours

Month: JUNE		Year: 2017		Country: CHILE	
Daily Totals					
Latitude	33°27' S	33°37' S	33°39' S	34°58' S	
Longitude	70°42' W	78°50' W	71°36' W	71°12' W	
Elevation	520 m	30 m	74 m	225 m	
Station					
Date	QUINTA NORMAL	ROBINSON CRUSOE	SANTO DOMINGO	CURICO	
1	5.5	3.0	5.2	0.0	
2	1.0	3.5	0.7	0.0	
3	8.7	5.0	6.5	7.1	
4	6.5	2.1	6.9	3.9	
5	0.6	4.1	5.9	5.7	
6	7.0	2.0	6.1	4.7	
7	0.0	3.1	0.0	0.0	
8	0.8	5.7	2.8	1.2	
9	6.4	1.3	6.5	6.1	
10	6.7	3.9	6.2	4.9	
11	7.0	3.9	6.8	2.3	
12	6.4	0.0	7.0	0.0	
13	0.7	0.3	0.0	0.3	
14	0.0	1.2	0.7	0.0	
15	0.1	0.5	4.7	8.0	
16	0.9	1.3	0.0	1.2	
17	0.0	3.8	5.6	4.4	
18	6.3	2.7	6.2	7.2	
19	0.0	2.0	0.0	0.0	
20	6.3	0.0	0.0	0.0	
21	0.0	0.8	0.0	0.0	
22	0.0	1.5	0.0	0.0	
23	0.0	0.0	0.0	0.7	
24	0.0	0.0	0.0	0.0	
25	1.0	0.0	0.0	0.0	
26	0.0	0.0	0.0	0.0	
27	5.3	2.5	6.7	5.6	
28	6.6	3.7	6.1	0.1	
29	6.7	4.7	5.8	4.8	
30	6.0	1.8	6.0	4.8	
31					
<b>TT\Monthly Totals</b>					
<b>Daily Means</b>					
<b>SS\Monthly Totals</b>	<b>96.5</b>	<b>64.4</b>	<b>102.4</b>	<b>73.0</b>	
<b>Daily Means</b>	<b>3.2</b>	<b>2.1</b>	<b>3.4</b>	<b>2.4</b>	
<b>Types of Instruments</b>	<b>HELIOGRAPH CAMPBELL STOKES</b>	<b>HELIOGRAPH CAMPBELL STOKES</b>	<b>HELIOGRAPH CAMPBELL STOKES</b>	<b>HELIOGRAPH CAMPBELL STOKES</b>	