



# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AMBIENTE INTERIOR (IEQ)  
DE UNA MUESTRA DE AULAS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA  
MECÁNICA DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
MEDIANTE UN MODELO VALIDADO EN OTRA DEPENDENCIA DE  
LA UNIVERSIDAD CON EL USO DEL SOFTWARE DESIGN  
BUILDER**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**DAVID ALEJANDRO ESPINOSA CONGO**

**david.espinosa@epn.edu.ec**

**KELLY ANAÍS FLORES ANDINO**

**kelly.flores@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: Lic. Jesús López Villada, PhD**

**jlopezv2011@gmail.com**

**CODIRECTOR: Ing. Miguel Ortega López, MSc**

**miguel.ortega@epn.edu.ec**

**Quito, septiembre 2021**

# CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por David Alejandro Espinosa Congo y Kelly Anaís Flores Andino, bajo nuestra supervisión.

**JESUS  
LOPEZ  
VILLADA** Firmado digitalmente por  
JESUS LOPEZ  
VILLADA  
Fecha: 2021.11.19  
14:02:58 -05'00'

Lic. Jesús López Villada, PhD.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

**MIGUEL  
DARIO  
ORTEGA  
LOPEZ** Firmado digitalmente por MIGUEL  
DARIO ORTEGA LOPEZ  
Nombre de reconocimiento (DN): cn=EC,  
serialNumber=1709931396, ou=ORTEGA  
LOPEZ, cn=MIGUEL DARIO ORTEGA  
LOPEZ,  
1.2.841.4.1.37442.10.4=1709931396,  
ou=Certificado de Clase 2 de Persona  
Física EC (PRIMA), givenName=MIGUEL  
DARIO,  
email=migueldarioortega@hotmail.com,  
2.5.4.1.3=Certificado para Persona  
Natural, +591CHINCHA, LCQUITO  
Fecha: 2021.11.17 18:31:23 -05'00'

Ing. Miguel Ortega, MSc

**CODIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Nosotros, David Alejandro Espinosa Congo y Kelly Anaís Flores Andino declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



---

David Alejandro Espinosa Congo



---

Kelly Anaís Flores Andino

## DEDICATORIA

A Dios, que me ha dado la vida, por su amor perfecto, por ser la alegría de mi corazón y el gozo de mi alma.

Le doy las gracias por su apoyo y protección, porque me ama y dio su vida por mí, porque ilumina mi sendero y es luz en la oscuridad; porque sus enseñanzas son perfectas, reconfortan el alma y ayudan a los ignorantes a volverse sabios. Él es quien me reviste de valor y perfecciona mi camino. Le doy gracias por su bondad y su fiel amor que estarán conmigo toda la vida.

David

A quién lo ha dado todo por mí y me amó desde antes de la fundación del mundo. Nosotros le amamos a Él porque Él nos amó primero.

A quien me ha permitido conocer la grandeza de su amor y misericordia, quien a pesar de mi infidelidad Él ha permanecido siempre fiel. Quien me ha dado identidad como hija por medio del sacrificio de nuestro Señor Jesucristo en la cruz. ¡Gracias Señor!

Porque de tal manera amó Dios al mundo, que ha dado a su Hijo unigénito, para que todo aquel que en él cree no se pierda, sino que tenga vida eterna. (Juan 3:16).

Gracias por el privilegio de ser su hija y de ver hecho realidad un sueño materializado en este título profesional.

Y a Aquel que es poderoso para hacer todas las cosas mucho más abundantemente de lo que pedimos o entendemos, según el poder que actúa en nosotros, a Él sea la gloria en la Iglesia en Cristo Jesús por todas las edades, por los siglos de los siglos (Efesios 3:20).  
Amén.

Kelly

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios quien me ha dado su bendición y su propósito y a quien le debo todo lo que soy. A mi madre Angelita que es mi inspiración y la persona más importante de mi vida, le doy las gracias porque de ella he aprendido el valor del amor y de los buenos sentimientos, la virtud de actuar con respeto y humildad, la determinación para hacer bien las cosas, el trabajo honesto y la constancia para alcanzar los sueños, por compartir todas mis alegrías y por ayudarme en mis tristezas, por sufrir días y noches enteras trabajando honestamente para que yo pueda ser un hombre de bien. Le doy las gracias por existir, por ser el motivo para que sonría; le doy las gracias por tenerme en su corazón y hacer que los sueños sean posibles.

A mi tía Marisol que siempre ha estado presente para brindarme su apoyo y consejo, le doy las gracias por todas las enseñanzas que me ha dado para que pueda ser una mejor persona, gracias por su esfuerzo y tenacidad que me han servido de ejemplo de vida.

Le doy gracias a mi familia, a Dayana, Odalis, Victoria, Roger, Roberto y Jesús quienes siempre me han dado su apoyo incondicional y me han llenado de risas. A Carlos, Aide, Pepe y Mery que son mi segunda familia, gracias por la guía que le han dado a mi vida, gracias por su buen corazón y por su ayuda en los momentos difíciles. A Carmela que siempre me tiene presente es sus oraciones.

A nuestros directores de tesis el PhD. Jesús López y al Ing. Miguel Ortega por ayudarnos y guiarnos en cada etapa del proyecto de titulación. Al Ing. Freddy Ordoñez por facilitarnos los datos meteorológicos de la estación de SCINERGY. Al Ing. Carlos Naranjo por sus recomendaciones que ha sido de gran aporte. Al Ing. Marco Páez por facilitarnos el acceso a las instalaciones del laboratorio de termodinámica de la EPN.

A mi compañera de tesis Kelly por ser una mujer valiente, por su bondad, comprensión y ayuda, gracias por cada esfuerzo y decisión para poder lograr nuestra meta. También doy las gracias a todos los amigos y personas que hicieron posible esto, comparto este logro con todos ustedes.

David

Gracias a mi buen Dios, a mis padres Sonia y Germán, a mi hermana Karen y su esposo Cristian. Gracias por amarme y apoyarme siempre, por entenderme y por corregirme cuando ha sido necesario, por guiarme y enseñarme el significado de tener una familia. Gracias mi Dios por su bondad reflejada en cada uno de ellos. Gracias por su esfuerzo de todos los días para mi bien.

A mis amigas Anita y Jessy Villarreal, Dayana Herrera, Ángeles Lema, Karlita Estévez, Pame Quille y Cristina Ayala; gracias por haberme enseñado el valor de una amiga y por ser un ejemplo de perseverancia en la fe en nuestro Señor Jesús. Gracias por cada palabra de aliento en cada momento oportuno.

A Cristian por su amor, nobleza y generosidad conmigo durante 12 años de mi vida, por su carácter extrovertido y humilde que me hace sonreír, por enseñarme a compartir y sobre todo por mostrarme que es de humanos errar y que es posible cambiar para bien con la dirección de Dios. Gracias por mostrarme que a pesar de las dificultades de la vida siempre hay un camino para salir adelante y para dar amor y felicidad a los que nos rodean.

A mi compañero de tesis David, por sus muchas cualidades que me ha permitido conocer sobre todo por su paciencia y entrega total durante este largo camino. A Paúl Aranda, John Delgado, David López, Teófilo Esparza, Indira Jácome y Alejandro Flores de Valgas por su amistad y apoyo en el transcurso de mi vida universitaria.

A toda mi familia, de manera especial a mis tíos Noemí y Guillermo y a mi primo Danny y a todos quienes de alguna manera me han mostrado su amor.

También agradezco a mi tutor y cotutor PhD. Jesús López e Ing. Miguel Ortega y a los docentes de la EPN Ing. Freddy Ordóñez, Ing. Carlos Naranjo e Ing. Marco Páez por su guía y aporte significativo en este trabajo de titulación.

Kelly

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN .....	i
DECLARACIÓN .....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
RESUMEN .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	xiv
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Antecedentes .....	3
1.2. Definición e importancia de IEQ.....	4
1.2.1. Confort Térmico.....	4
1.2.2. <i>Indoor Air Quality (IAQ)</i> .....	8
1.3. Parámetros que influyen en la IEQ en edificaciones .....	11
1.3.1. Clima.....	11
1.3.2. Ubicación Geográfica y orientación.....	12
1.3.3. Materiales de Construcción .....	13
1.3.4. Infiltraciones .....	13
1.3.5. Ocupación y actividad.....	15
1.4. Normativa referente a IEQ.....	15
1.4.1. <i>ASHRAE Handbook Fundamentals 2017</i> .....	15
1.4.2. <i>ASHRAE Standard 62.1-2019, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality</i> .....	15
1.4.3. <i>ASHRAE Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy</i> .....	16

1.4.4.	NEC 11 Capítulo 13, Norma Ecuatoriana de la Construcción: Eficiencia energética en la construcción en Ecuador .....	16
1.5.	Software .....	16
2.	METODOLOGÍA.....	17
2.1.	Instrumentos de medición de IEQ.....	17
2.1.1.	Selección de los equipos .....	17
2.1.2.	Análisis estadístico de los datos de IEQ en la ciudad de Quito .....	18
2.2.	Definición del lugar .....	24
2.3.	Obtención de los datos de IEQ en las dependencias de la EPN .....	25
2.4.	Modelado en Design Builder .....	26
2.4.1.	Modelado de la Biblioteca Central en <i>DesignBuilder</i> .....	26
2.4.2.	Descripción de la zonificación de la biblioteca central.....	29
2.4.3.	Modelado de la Facultad de Ingeniería Mecánica en <i>DesignBuilder</i> .....	30
2.4.4.	Condiciones de simulación del edificio FIM.....	33
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	35
3.1.	Análisis estadístico de los resultados del equipo Extech CO240 en Quito. ....	35
3.1.1.	Análisis estadístico TBS Psicrómetro y TBS Extech .....	35
3.1.2.	Análisis estadístico TBH Psicrómetro y TBH Extech.....	36
3.1.3.	Análisis estadístico HR Psicrómetro y HR Extech.....	37
3.1.4.	Indicadores estadísticos para el equipo Extech .....	38
3.2.	Resultados de las mediciones de IEQ en la Biblioteca Central y análisis comparativo con las simulaciones en <i>DesignBuilder</i> .....	39
3.3.	IEQ de las aulas de la FIM.....	47
3.4.	Confort Térmico.....	55
3.4.1.	Confort térmico en las aulas M201, M101 y M110 de la FIM .....	55
3.4.2.	Análisis de confort térmico en las aulas M201, M101 y M110 de la FIM .....	56
3.5.	Indoor Air Quality (IAQ) .....	62
3.5.1.	IAQ en las aulas M201, M101 y M110 de la FIM.....	62



3.5.2. CO2 exhalado como riesgo de infección por COVID 19 para diferentes entornos y actividades interiores.....	70
4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	72
4.1. Conclusiones.....	72
4.2. Recomendaciones.....	75
4.3. Trabajos futuros .....	76
Referencias Bibliográficas .....	77
ANEXO I. Metabolic rates (tasa metabólica) para actividades varias.....	81
ANEXO II. Datos medidos con el equipo Extech CO240 en la Biblioteca Central de la EPN.....	83
ANEXO III. Condiciones y datos de entrada para la simulación de la Biblioteca Central de la EPN.....	85
ANEXO IV. Modelado 3D de la planta baja, segundo y tercer piso de la FIM .....	89
ANEXO V. Estadística Descriptiva .....	93
ANEXO VI. Cartas psicrométricas y confort térmico .....	94
ANEXO VII. Gráficas de CO <sub>2</sub> .....	113
ANEXO VIII. Funcionamiento del software <i>DesignBuilder</i> .....	119
ANEXO IX. Confort térmico en las aulas M201, M101 y M110 .....	128
ANEXO X. IAQ en las aulas M201, M101 y M110 .....	135

# ÍNDICE DE FIGURAS

## Capítulo 1

Figura 1. 1. Rangos de temperatura operativa aceptable en espacios con ventilación natural.....	6
Figura 1. 2. Diagramas solares de la EPN para los meses de enero y julio del 2020. ....	12

## Capítulo 2

Figura 2. 1. Extech CO240 y Psicrómetro.....	18
Figura 2. 2. Ubicación de la EPN en la ciudad de Quito. ....	24
Figura 2. 3. Rotación de los edificios de la Biblioteca Central y la FIM. ....	25
Figura 2. 4. Zonificación en <i>DesignBuilder</i> de la Biblioteca Central. ....	29
Figura 2. 5. Vista axonométrica de la Biblioteca Central.....	29
Figura 2. 6. Fachada exterior principal de la Biblioteca Central. ....	30
Figura 2. 7. Vista axonométrica en <i>DesignBuilder</i> de la FIM. ....	31
Figura 2. 8. Vista superior del primer piso (zonificación) en <i>DesignBuilder</i> de la FIM. ....	31
Figura 2. 9. Figura 2.9. Vista axonométrica del primer piso en <i>DesignBuilder</i> de la FIM..	32
Figura 2. 10. Soleamiento de la FIM en <i>DesignBuilder</i> . ....	32

## Capítulo 3

Figura 3. 1. TBS Psicrómetro [°C] y TBS Extech CO240 [°C]. ....	35
Figura 3. 2. Histograma de TBS Psicrómetro [°C] y TBS Extech CO240 [°C]. ....	35
Figura 3. 3. Gráfico de caja y bigotes de TBS Psicrómetro [°C] y TBS Extech CO240 [°C]. .....	35
Figura 3. 4. TBH Psicrómetro [°C] y TBH Extech CO240 [°C].....	36
Figura 3. 5. TBH Histograma de TBH Psicrómetro [°C] y TBH Extech CO240 [°C].....	36
Figura 3. 6. Gráfico caja y bigotes de TBH Psicrómetro [°C] y TBH Extech CO240 [°C].	37
Figura 3. 7. HR Psicrómetro [%] y HR Extech CO240 [%]. ....	37
Figura 3. 8. Histograma de HR Psicrómetro [%] y HR Extech CO240 [%]. ....	38
Figura 3. 9. Gráfico de caja y bigotes de HR Psicrómetro [%] y HR Extech CO240 [%]...	38
Figura 3. 10. Gráficas de dispersión de Tint. seca [°C] medida vs Tint. seca [°C] simulada para los días 13-feb (a), 14-feb (b), 17-feb (c), 18-feb (d), 19-feb (e) en la Biblioteca central	

de la EPN. Se indican los límites de error del equipo de medición con las líneas a trazos. .....	40
Figura 3.11. Gráficas de dispersión de HR [%] medido vs HR [%] simulado para los días 13-feb (a), 14-feb (b), 17-feb (c), 18-feb (d), 19-feb (e) en la Biblioteca central de la EPN. Se indican los límites de error del equipo de medición con las líneas a trazos. ....	41
Figura 3.12. Gráficas de dispersión de CO <sub>2</sub> [ppm] medido vs CO <sub>2</sub> [ppm] simulado para los días 13-feb (a), 14-feb (b), 17-feb (c), 18-feb (d), 19-feb (e) en la Biblioteca central de la EPN. Se indican los límites de error del equipo de medición con las líneas a trazos.....	42
Figura 3. 13. Índice estadístico RMSE [%] de temperatura interior seca (a), humedad relativa (b) y CO <sub>2</sub> (c) en cada día de medición.....	44
Figura 3. 14. Índice estadístico MAE [%] de temperatura interior seca (a), humedad relativa (b) y CO <sub>2</sub> (c) en cada día de medición. ....	44
Figura 3. 15. Índice estadístico MBE [%] de temperatura interior seca (a), humedad relativa (b) y CO <sub>2</sub> (c) en cada día de medición. ....	45
Figura 3. 16. Tint.seca [°C] en las aulas M101, M102, M110, M201, M202, M210 y M215 de la FIM en los meses de enero (a), abril (b), julio (c) y octubre (d) en el modelo de alta ocupación y baja ventilación (M4). ....	50
Figura 3. 17. HR [%] en las aulas M101, M102, M110, M201, M202, M210 y M215 de la FIM en los meses de enero (a), abril (b), julio (c) y octubre (d) en el modelo de alta ocupación y baja ventilación (M4). ....	52
Figura 3. 18. CO <sub>2</sub> [ppm] en las aulas M101, M102, M110, M201, M202, M210 y M215 de la FIM en los meses de enero (a), abril (b), julio (c) y octubre (d) en el modelo de alta ocupación y baja ventilación (M4). ....	54
Figura 3. 19. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M201 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h). ....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo 1

Tabla 1. 1. Tasa metabólica basal (BMR).....	10
Tabla 1. 2. Principales vías de infiltraciones.....	14
Tabla 1. 3. Porcentaje de infiltraciones.....	14

### Capítulo 2

Tabla 2. 1. Condiciones de simulación de ocupación de la FIM.....	33
Tabla 2. 2. Escenarios de simulación para ventilación en alta ocupación.....	34
Tabla 2. 3. Escenarios de simulación para ventilación en baja ocupación.....	34

### Capítulo 3

Tabla 3. 1. Índices estadísticos de comparación de datos tomados por Extech CO240 y psicrómetro. ....	39
Tabla 3. 2. Índice estadístico RMSE de temperatura, humedad relativa y CO <sub>2</sub> de los días simulados.....	46
Tabla 3. 3. Índice estadístico MAE de temperatura, humedad relativa y CO <sub>2</sub> de los días simulados.....	46
Tabla 3. 4. Índice estadístico MBE de temperatura, humedad relativa y CO <sub>2</sub> de los días simulados.....	47
Tabla 3. 5. Temperatura operativa de confort recomendada. ....	55
Tabla 3. 6. Zona de confort térmico según normativa NEC 11.....	56
Tabla 3. 7. Porcentaje de horas de confort térmico en el aula M201 en alta ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).....	58
Tabla 3. 8. Porcentaje de horas de confort térmico en el aula M201 en baja ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).....	58

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la calidad del ambiente interior (IEQ) de una muestra de aulas de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional mediante un modelo validado en la biblioteca central de la universidad con el uso del software *DesignBuilder*. Evaluar IEQ comprende el estudio del confort térmico y el análisis de la concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en el interior de las aulas. El trabajo inicia con la revisión bibliográfica de la normativa *ASHRAE 62.1-2016*, NTP 549 y NEC 11 en donde se abordan los factores que definen el confort térmico y dióxido de carbono recomendable en ambientes interiores y sus formas de cálculo. Se describe a detalle el funcionamiento del software *DesignBuilder* junto al desarrollo del modelo de la Biblioteca Central y edificio de la Facultad de Ingeniería Mecánica (FIM). Posteriormente se valida el equipo Extech CO240 (medidor de la calidad del aire) mediante la toma de medidas de temperatura de bulbo seco (TBH), temperatura de bulbo húmedo (TBH) y humedad relativa (HR). A continuación, se valida el modelo desarrollado en el software y finalmente se muestran los resultados de la simulación de confort térmico expresado en porcentaje de horas de confort térmico en los meses de enero, abril, julio y octubre para las aulas M101, M201 y M110 en condición de alta y baja ocupación en los escenarios de ventilación baja (M4), ventilación media (M2) y ventilación máxima (M1). Además, se analiza la concentración en ppm del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en las mismas aulas cuyo resultado se expresa en porcentaje de horas que el  $\text{CO}_2$  se encuentra en el rango recomendado por *ASHRAE* y NTP 549. Los resultados muestran que en el contexto de la pandemia por el COVID-19 las aulas de la FIM no se diseñaron con las recomendaciones de *ASHRAE IAQ Guide* lo que propicia y facilita el contagio del virus Sars-Cov-2 debido a los niveles insuficientes de ventilación evidenciados por la elevada concentración de  $\text{CO}_2$  en el interior de cada aula. Los resultados muestran valores de hasta 2700 ppm cuando las aulas están ocupadas, sobrepasando las recomendaciones de las normas *ASHRAE* (892 ppm) y NTP 549 (1000ppm).

**Palabras clave:** IEQ, confort térmico, concentración de  $\text{CO}_2$ , simulación, DesignBuider, validación del equipo Extech CO240, validación de la simulación, *ASHRAE*, NEC11.

## ABSTRACT

This research aims to evaluate the indoor environmental quality (IEQ) of a sample of classrooms located in the Faculty of Mechanical Engineering at Escuela Politécnica Nacional through a model validated at the central library of the university with the use of *DesignBuilder* software. The evaluation of IEQ includes the study of thermal comfort and the analysis of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration inside the classrooms. The work begins with literature review of the *ASHRAE 62.1*, NTP 549 and NEC11 regulations that address indoor environmental factors that define the thermal comfort and the recommended carbon dioxide allowed in classrooms. The operation of the *DesignBuilder* software is described in detail along with the development of the Central Library model and the Mechanical Engineering building (FIM). Subsequently, Extech CO240 equipment (air quality meter) is validated in terms of dry bulb temperature (DBT), wet bulb temperature (WBT) and relative humidity (RH) measurements. The developed model was implemented in the software to simulate thermal comfort and the results are shown in percentage of hours of thermal comfort for January, April, July and October in M101, M201 and M110 classrooms in high and low occupancy conditions and under low ventilation (M4), medium (M2) and high (M1) ventilation rates scenarios. In addition, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration in the same classrooms is analyzed, finding a percentage of hours that CO<sub>2</sub> is in the *ASHRAE* and NTP 549 recommended range. As an additional result in the COVID-19 pandemic context, FIM classrooms were not designed with *ASHRAE IAQ Guide* recommendations which facilitates and causes the spread of the Sars-Cov-2 virus due to the high concentration of CO<sub>2</sub>. The results show values up to 2700 ppm when classrooms are occupied, exceeding the recommended values of the *ASHRAE* (892 ppm) and NTP 549 (1000ppm) standards.

**Keywords:** IEQ, thermal comfort, CO<sub>2</sub> concentration, simulation, DesignBuider, Extech CO240 equipment validation, simulation validation, *ASHRAE*, NEC11.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

IEQ	Calidad del ambiente interior ( <i>Indoor Environmental Quality</i> )
IAQ	Calidad del aire interior ( <i>Indoor Air Quality</i> )
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
NEC	Normativa Ecuatoriana de la Construcción
TBS	Temperatura de bulbo seco
TBH	Temperatura de bulbo húmedo
HR	Humedad relativa
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
M	Tasa metabólica ( <i>metabolic rate</i> )
S	Tasa de generación de CO <sub>2</sub> por persona
BMR	Tasa metabólica basal ( <i>basal metabolic rate</i> )
t <sub>c</sub>	Temperatura operativa de confort
Q <sub>as</sub>	Tasa de ventilación
RMSE	Media de la raíz del error cuadrado ( <i>root mean squared error</i> )
MAE	Media del error absoluto ( <i>mean absolute error</i> )
MBE	Media del error de sesgo ( <i>mean bias error</i> )
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinación ( <i>r cuadrado</i> )

## INTRODUCCIÓN

La calidad del ambiente interior (IEQ, *Indoor Environmental Quality*) tiene mucha importancia en las sociedades modernas para mantener un entorno ambiental saludable. En un día cotidiano las personas pasan la mayor parte de su tiempo en lugares cerrados como viviendas, oficinas, fábricas, universidades, etc., especialmente en entornos urbanos. Hay varios factores que influyen en la calidad del ambiente interior como la temperatura, la humedad relativa, la presencia de compuestos orgánicos volátiles (VOC), el material particulado (PM), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), etc. [1]. Para conocer si la IEQ es adecuada es necesario realizar mediciones de los factores mencionados, los mismos que deben estar dentro del rango establecido por *ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers)* en la normativa *ANSI / ASHRAE 62.1-2016* y por *ASHRAE Handbook 2017*; por el rango establecido por NTP (Normas Técnicas de Prevención) en la normativa NTP 549 y por la NEC (Normativa Ecuatoriana de la Construcción) en el capítulo 11. Cuando la IEQ no alcanza estándares mínimos establecidos en las normas se provocan impactos adversos en la salud de las personas como: malestar, decaimiento, falta de atención y somnolencia afectando su desempeño estudiantil y laboral [2]. La IEQ varía dependiendo del lugar, es decir en el área industrial seguramente se encontrará componentes contaminantes adicionales a los nombrados anteriormente cuyos agentes de contaminación podrían causar incluso la muerte del individuo tal es así en trabajos de alta exposición a contaminantes ambientales en la industria Petrolera y en lugares donde se desarrolle combustión interna con frecuencia.

Las aulas de la Escuela Politécnica Nacional fueron diseñadas y construidas sin las pautas y recomendaciones de *ASHRAE (ANSI / ASHRAE 62.1-2016, Indoor Air Quality Guide, ASHRAE Handbook)* y la normativa NTP 549. Por lo tanto, se puede predecir que posiblemente la IEQ en estas aulas es inadecuado para el desempeño de actividades educativas de estudiantes y profesores de la Escuela Politécnica Nacional (EPN). Para cuantificar este problema se realizará un estudio experimental y simulación para evaluar la calidad del aire en las aulas M101, M110 y M201 de la Facultad de Ingeniería Mecánica (FIM).

La contribución referente al estudio de IEQ no solo pretende el desarrollo del mismo sino también despertar el interés de estudiantes, profesores y autoridades al estudio de confort ambiental con la intención de crear e innovar sistemas y medios que ayuden a mitigar problemas ambientales para minimizar los contagios de COVID-19.



## **Pregunta de investigación**

¿La IEQ en las aulas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN cumple con los estándares de calidad nacionales (NEC) e internacionales (ASHRAE)?

## **Objetivo general**

Evaluar la calidad del ambiente interior (IEQ) de una muestra de aulas de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional mediante un modelo validado en otra dependencia de la universidad con el uso del Software *DesignBuilder*.

## **Objetivos específicos**

- Establecer una metodología para la evaluación y toma de datos de CO<sub>2</sub>, humedad relativa y temperatura en algunas dependencias de la EPN.
- Establecer una metodología para el análisis y procesamiento de los datos obtenidos experimentalmente.
- Simular la IEQ de la Biblioteca Central con el uso del software *DesignBuilder*.
- Comparar el modelo con las medidas tomadas experimentalmente.
- Aplicar el modelo en las aulas de la FIM.
- Comparar los resultados obtenidos con los valores permitidos en la normativa *ASHRAE 62.1 2016*.

## **Alcance**

Este proyecto de titulación se limita a la evaluación de IEQ (*Indoor Environmental Quality*) concernientes a confort térmico (Temperatura y humedad relativa) y CO<sub>2</sub> en las aulas M101, M110 y M201 de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN mediante simulación en el software *DesignBuilder*.

# 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se realiza un estudio teórico de IEQ (*Indoor Environmental Quality*), sus conceptos y su definición. Se presenta un preámbulo de IAQ y confort térmico y los parámetros que los modifican; se incluyen normativas y reglamentos nacionales e internacionales acerca de IEQ, para posteriormente contrastar con los valores medidos experimentalmente. También, se explica el entorno del software *DesignBuilder* y su funcionamiento.

## 1.1. Antecedentes

La IEQ es de gran importancia para tener un medio ambiente saludable. Generalmente en las zonas urbanas las personas se encuentran hasta el 90% de su tiempo en lugares cerrados. Sin embargo, estos espacios pueden presentar altas concentraciones de contaminantes específicos, lo que induce un riesgo en la salud humana; así como en el desempeño laboral y académico [3]. Los contaminantes del aire pueden ser compuestos químicos y/o material particulado que se transfieren desde el exterior o se producen en el interior a causa de los materiales de construcción, muebles, productos de consumo de los ocupantes, los propios ocupantes y las actividades que realizan [4].

En el Ecuador el estudio de IEQ es deficiente. Según investigaciones no se encuentran datos específicos de componentes contaminantes. Únicamente se tiene constancia de estudios de confort térmico y datos meteorológicos mas no de IAQ [41]. Recientemente se ha medido el CO<sub>2</sub> en oficinas y aulas de la Escuela Politécnica Nacional y la Escuela Politécnica del Litoral en donde se ha encontrado valores hasta de 5000 ppm de forma que no se alcanzan estándares aceptables recomendados por las normas [33].

La norma *ASHRAE 62.1-2016* [5] menciona que en un ambiente interior se recomienda 1000 ppm de CO<sub>2</sub> en edificios universitarios, escuelas, colegios, oficinas de trabajo, etc., y si se encuentran valores mayores a tales se provoca disminución de concentración y rendimiento en el desarrollo de actividades que una persona realiza.

En otros países de acuerdo con estudios realizados en edificios y aulas de clase se ha encontrado componentes contaminantes como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), aldehídos (formaldehído y acetaldehído), compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y material particulado (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>). Estos compuestos contaminantes deben ser monitoreados y controlados, caso contrario pueden causar graves consecuencias tanto al medio ambiente como a la salud de las personas; en los casos más problemáticos han causado cáncer y la muerte. El

estudio debe ser priorizado en lugares donde habitan niños y ancianos debido a su vulnerabilidad y sitios de concentración masiva de personas.

## **1.2. Definición e importancia de IEQ**

La IEQ (*Indoor Environmental Quality*, calidad del ambiente interior) engloba el estudio de las condiciones ambientales de aulas, oficinas, dormitorios, departamentos de vivienda, hoteles y cualquier lugar cerrado en el que se busca una buena calidad del aire. La IEQ es un factor elemental en las construcciones modernas destinadas a la ocupación de las personas, incluye la IAQ (*Indoor Air Quality*, calidad del aire interior) y el confort térmico. IAQ es un concepto referente a los contaminantes del aire en el interior y los alrededores de edificios y confort térmico que está fuertemente ligado con las condiciones térmicas del lugar.

La IEQ corresponde un importante aspecto de caracterización y determinación de la calidad del aire tomando en cuenta componentes contaminantes y sus composiciones; incluye confort térmico relacionado con temperatura, humedad relativa y velocidad del aire principalmente; además incluye factores que varían el estado de confort de una persona como la tasa metabólica personal, tipo de ropa usada y la temperatura radiante existente en el medio [6].

### **1.2.1. Confort Térmico**

Se conoce como confort térmico al estado de bienestar o satisfacción de un individuo desde el punto de vista del equilibrio térmico y sus relaciones, el mismo que es subjetivo. Se considera aceptable un ambiente interior cuando al menos el 80% de los habitantes lo consideren confortable [6]. Hay 6 factores principales que definen el confort térmico y son:

#### **Tasa metabólica, M**

Es la tasa de transformación de energía química en calor y trabajo mecánico por actividades metabólicas que suceden dentro de un organismo, generalmente se expresa en términos de energía por unidad de área de la superficie total corporal (persona adulta)  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$  y unidades *met* [6].

*ASHRAE 55-2010*, Anexo A; muestra la tasa metabólica típica de una persona al desarrollar actividades continuas en trabajos de oficina (actividades sedentarias) en las unidades antes mencionadas. En el Anexo 1 de este escrito se reescribe los valores *met* que se recomienda para el cálculo de confort térmico.

La unidad *met* es útil para describir la energía generada dentro del cuerpo debido a la actividad metabólica, definida como  $58,2\left[\frac{W}{m^2}\right]$  o  $18,4\left[\frac{BTU}{h*ft^2}\right]$ . *Met* es igual a la energía producida por unidad de superficie de piel de una persona adulta promedio en estado de reposo. La superficie de área de piel de una persona adulta promedio es de  $1,8\text{ m}^2$  o  $19\text{ ft}^2$  [6].

*ASHRAE Handbook* muestra los valores de tasa metabólica por persona en unidades  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$  y *met*. La sección 9.6, recomienda calcular un valor combinado de las actividades que realiza una persona, de la siguiente manera:

$$M_{prom} = f_1 * M_1 + f_2 * M_2 + f_3 * M_3 \quad (1.1.)$$

Donde:

$M_{prom}$ : tasa metabólica promedio  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

$f_n$ : fracción de tiempo ocupado en la actividad

$M_n$ : tasa metabólica por actividad

### **Aislamiento por vestimenta**

El aislamiento por vestimenta es una variable demandante en el confort térmico, se expresa como un valor *clo* ( $I_{cl}$ ) e indica la resistencia a la transferencia de calor proporcionada por un conjunto de ropa;  $1\text{ clo} = 0,155\left[\frac{m^2*K}{W}\right]$  o  $0,88\left[\frac{ft^2*h*°F}{BTU}\right]$ . En el Anexo 1, se reescribe los valores *clo* recomendado para el cálculo del confort térmico descrito en *ASHRAE 55-2010*, Anexo B [6].

### **Temperatura radiante**

Es la temperatura generada por la transferencia de calor por radiación de los cuerpos incidentes sobre un entorno, la misma que es medida por una esfera negra (contiene un termómetro de mercurio) para lograr medir únicamente la temperatura generada por radiación. Como resultado, los cuerpos radiantes intercambiarían la misma cantidad de calor en un recinto negro y en un espacio no aislado. En el confort térmico se la conoce como temperatura radiante media [6].

### **Temperatura del aire**

Es la temperatura del aire que rodea a los ocupantes, es decir la temperatura del aire interior. La normativa ecuatoriana de la construcción NEC recomienda valores de

temperatura de aire interiores de 19°C a 26°C [8] y *ASHRAE* plantea el modelo adaptativo de confort térmico legible mediante una gráfica.

La figura 1.1. muestra el modelo adaptativo de *ASHRAE* que incluye dos sets de temperaturas operativas, una con el 80% de aceptabilidad y una para el 90% de aceptabilidad. Es recomendable usar límites de temperatura operativa con el 90% de aceptabilidad de los ocupantes. El 80% de aceptabilidad puede ser usada en aplicaciones particulares donde no exista la información necesaria. Es útil acotar que la gráfica no permite extrapolaciones de datos, únicamente es válida usar en condiciones de temperatura media por mes comprendida entre 10°C a 33,5°C, para un espacio ventilado naturalmente. Fuera de estas condiciones la gráfica no puede ser usada [6].

El modelo adaptativo define la zona de confort térmico en términos de un rango de temperatura operativa de confort ( $t_{oc}$ ). La temperatura operativa es la temperatura que engloba la ganancia de calor por convección y por radiación de objetos y cuerpos; por tanto, es el promedio entre la temperatura del aire interior y la temperatura media radiante.

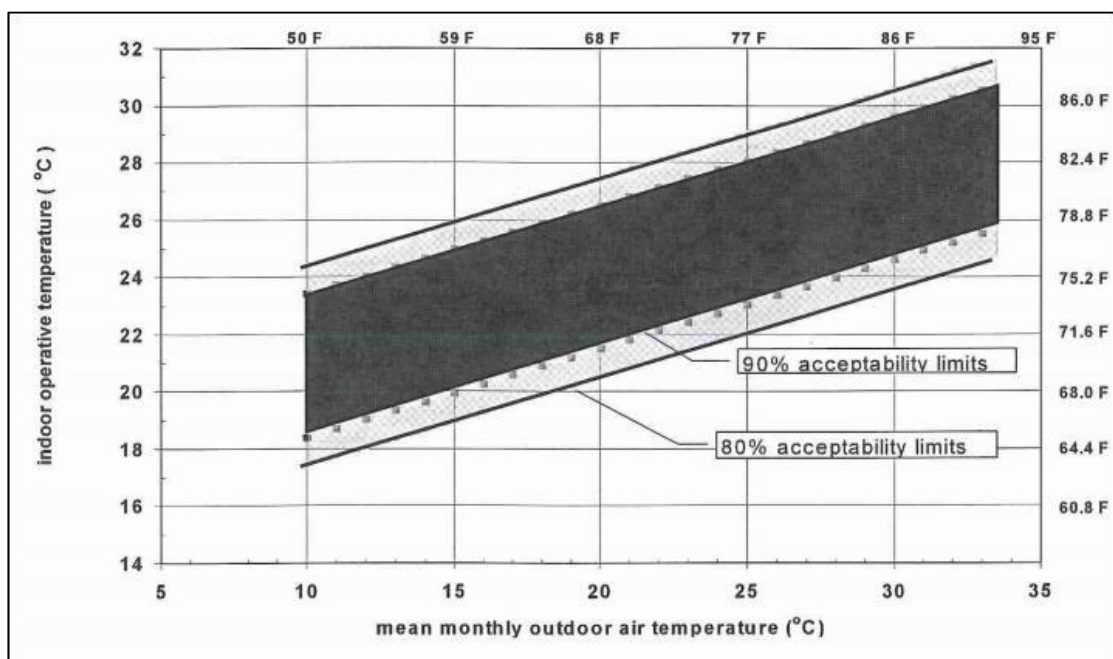


Figura 1. 1. Rangos de temperatura operativa aceptable en espacios con ventilación natural. (Fuente: [6])

*ASHRAE Handbook 2017* plantea un modelo matemático que considera la temperatura de bulbo seco exterior para el cálculo de la temperatura operativa de confort térmico recomendado. Las temperaturas de confort térmico resultantes de *ASHRAE* son coincidentes, tanto el método gráfico (mostrado en la figura 1.1.) como el analítico. A continuación, se muestra la fórmula que rige el modelo adaptativo de ( $t_{oc}$ ) [7].

$$t_{oc} = 17,8 + 0,31 * t_{out} \quad (1.2.)$$

Donde:

$t_{oc}$ : temperatura operativa de confort

$t_{out}$ : temperatura de bulbo seco exterior media mensual

Las temperaturas límite del modelo adaptativo al 90% de aceptabilidad son aproximadamente:

$$t_{ls} = t_{oc} + 2,5^{\circ}C \quad (1.3.)$$

$$t_{li} = t_{oc} - 2,2^{\circ}C \quad (1.4.)$$

Donde:

$t_{ls}$ : temperatura operativa de confort (límite superior)

$t_{li}$ : temperatura operativa de confort (límite inferior)

Es importante mencionar que la zona de confort definida por las temperaturas operativas de confort puede variar y dependen de los seis factores mencionados anteriormente. Por razones de simplificación es conveniente usar el modelo adaptativo de confort térmico que enfatiza la obtención de ( $t_{oc}$ ) en la temperatura de bulbo seco exterior. La obtención de los límites de temperatura operativa de confort se hace por mes y deben ser analizados mensualmente; sin embargo, por facilidad es posible encontrar un valor promedio entre los valores de ( $t_{oc}$ ) mensuales calculados y expresar un resultado global de temperatura operativa de confort para comparaciones posteriores.

### **Velocidad del aire**

Es la tasa de movimiento del aire en un punto, no considera dirección. La velocidad de aire recomendada para un ambiente interior adecuado es de valor menor o igual a 0,2 m/s. En la normativa *ASHRAE* la gráfica de zona de confort (modelo analítico) considera esta condición [6].

### **Humedad**

Es la cantidad de humedad en el aire, se la describe por varias variables termodinámicas como presión, temperatura de punto de rocío y la humedad específica.

Una manera muy común de describir la humedad del aire es mediante la humedad relativa [HR] y humedad específica. Humedad relativa es la relación entre la presión parcial (o densidad) del vapor de agua y la presión de saturación (o densidad) del vapor de agua a una misma temperatura [6].

*ASHRAE 55- 2010* recomienda un valor límite superior de 60% de HR, mientras que no especifica un límite inferior [6]. En la normativa NEC (Normativa Ecuatoriana de la construcción) recomienda un rango de 40% a 60% de HR en los ambientes interiores [8].

Se conoce que *ASHRAE* recomienda únicamente el nivel máximo de HR porque la piel tiene mayor sensibilidad a la excesiva humedad en el aire (incrementa el rozamiento entre la piel y la ropa) que a la escasez de humedad. El aire seco puede generar sequedad en las mucosas y en la piel sin embargo para que este fenómeno se lleve a cabo es necesario considerar otras variables como el punto de rocío.

### **1.2.2. Indoor Air Quality (IAQ)**

El estado precario de IEQ genera un desequilibrio térmico ya sea con aumento o disminución de la temperatura o con mayor concentración de contaminantes a causa de una escasa ventilación dentro del lugar. Según datos de OPS (Organización Panamericana de Salud) la contaminación del aire exterior en la salud de la gente es grave, en el año 2012 aproximadamente 7 millones de muertes prematuras ocurrieron debido a esta causa, la mayoría de muertes sucedidas en países de ingresos pobres. [9].

Según la OMS (Organización Mundial de la Salud) “la salud es un estado de bienestar físico, mental y social y no simplemente la ausencia de enfermedades”, por lo que una situación ideal es un ambiente sin contaminación controlado térmicamente [10].

Un ambiente ideal se encuentra modificado constantemente con la existencia e interacción de agentes físicos como la temperatura, el viento, la radiación solar, ruidos, etc.; agentes químicos como sustancias y/o compuestos orgánicos e inorgánicos; y agentes biológicos [9]. Cada aspecto de cualquier índole varía el estado de la calidad del aire, por tanto, es necesario enfocar el estudio en un área.

Esta investigación se centra en la evaluación de la calidad del aire interior de varias aulas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN que comprende tanto la evaluación del confort térmico como la generación de CO<sub>2</sub> en ellas.

### **Dióxido de carbono recomendable en ambientes interiores**

La normativa *ASHRAE HANDBOOK 2017*, capítulo 16, no recomienda un valor definitivo de CO<sub>2</sub> en lugares cerrados, pero sí plantea un modelo matemático de cantidad de CO<sub>2</sub> recomendable que depende de varios factores como la tasa de generación de CO<sub>2</sub> por persona, tasa de ventilación del lugar, la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior y exterior del lugar. Entonces, el valor de CO<sub>2</sub> recomendado varía de acuerdo con los factores definido

por el lugar de estudio. A continuación, se muestra el modelo matemático [7] de la cantidad de CO<sub>2</sub> recomendable.

$$C_i = C_o + 10^6 \times \frac{S}{Q_{oa}} \quad (1.5.)$$

Donde:

$C_i$ : concentración de CO<sub>2</sub> interior recomendado [ppm]

$C_o$ : concentración de CO<sub>2</sub> exterior [ppm]

$S$ : tasa de generación de CO<sub>2</sub> por persona  $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$

$Q_{oa}$ : tasa de ventilación  $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$

- **Tasa de generación de Dióxido de carbono por persona (S)**

Esta sección se centra en estimar la generación de dióxido de carbono por persona (S) a condiciones de presión (P) y temperatura (T) de la ciudad de Quito. La mayoría de los modelos matemáticos especificados en *ASHRAE* son desarrollados para condiciones a nivel del mar por lo que es necesario ajustar el modelo con el uso de la ley de los gases ideales para cumplir con el objetivo.

En el artículo “*Carbon dioxide generation rates for building occupants*” desarrollado en Estados Unidos por dos investigadores del área, muestran en su trabajo el procedimiento y análisis necesario para la obtención de la tasa de generación de CO<sub>2</sub> por persona considerando presión y temperatura, desde la obtención de la fórmula madre hasta su variante. En la ecuación 1.6 se muestra el modelo sugerido [11].

$$S = BMR \times M \times \left( \frac{T}{P} \right) * 0,000179 \quad (1.6.)$$

Donde:

$S$ : tasa de generación de CO<sub>2</sub> por persona  $\left[ \frac{L}{s} \right]$

$BMR$ : tasa metabólica basal  $\left[ \frac{MJ}{day} \right]$

$M$ : tasa metabólica [met]

$T$ : temperatura del lugar [K]

$P$ : presión atmosférica [kPa]



- **Tasa metabólica basal (BMR)**

Es un requerimiento de energía básico y esencial para la vida con el que un cuerpo humano realiza la función cerebral, función respiratoria, mantenimiento de la temperatura corporal, etc. Es el valor mínimo de energía que un ser vivo requiere para desarrollar las funciones básicas para vivir. BMR constituye del 45% al 70% del gasto energético diario y es principalmente una función de la edad, sexo, tamaño y composición corporal. Otro componente del gasto energético diario es el relacionado con la actividad física denominado tasa metabólica definido anteriormente [11]. En la tabla 1.1. se muestran las ecuaciones para estimar los valores de BMR. La ecuación presenta la variable  $m$  que corresponde a la masa del cuerpo en unidades [kg].

Tabla 1. 1. Tasa metabólica basal (BMR).

Age (y)	BMR: MJ/day	
	Males	Females
<3	$0.249 m - 0.127$	$0.244 m - 0.130$
3 to 10	$0.095 m + 2.110$	$0.085 m + 2.033$
10 to 18	$0.074 m + 2.754$	$0.056 m + 2.898$
18 to 30	$0.063 m + 2.896$	$0.062 m + 2.036$
30 to 60	$0.048 m + 3.653$	$0.034 m + 3.538$
$\geq 60$	$0.049 m + 2.459$	$0.038 m + 2.755$

(Fuente: [11])

Se requiere conocer BMR de un estudiante, por lo que se usa un rango de edad de 18 a 30 años y se escoge de la tabla anterior la ecuación para hombres y mujeres.

$$BMR_H = 0,063m + 2,896 \quad (1.7.)$$

$$BMR_M = 0,062m + 2,036 \quad (1.8.)$$

Se considera una masa promedio de 70 kg para hombres y 60 kg para mujeres además; se evalúan los valores BMR para hombres y mujeres y se promedian los dos resultados y el resultante se usa como valor de BMR total a usarse en la ecuación anterior.

- **Tasa de ventilación (Qoa)**

La cantidad de concentración de contaminantes depende de las fuentes emisoras o generadoras de contaminantes y la tasa total de eliminación de contaminantes. La experiencia en estos campos de estudio de la ingeniería, indican que un suministro de aire exterior aproximadamente de  $10 \left[ \frac{l}{s} \right]$  por persona es muy probable que proporcione una calidad de aire interior percibida aceptable en los espacios de oficina, mientras que las

bajas tasas de ventilación pueden conducir a síntomas del edificio enfermo (enfermedades respiratorias) [7].

- **Concentración de dióxido de carbono exterior**

El CO<sub>2</sub> es un gas contaminante de efecto invernadero causante del cambio climático y calentamiento global. Existen diferentes fuentes de emisión de CO<sub>2</sub> que pueden ser naturales y antrópicas. Las fuentes naturales son recursos hídricos (aguas termales), volcanes, incendios forestales y el CO<sub>2</sub> como producto de la respiración de personas y animales. Cabe recalcar que este compuesto químico es de vital importancia para la vida vegetal del planeta. Las fuentes antrópicas del CO<sub>2</sub> corresponden a todos los procesos realizados y generados por el ser humano como la combustión y quema de combustibles fósiles y derivados del petróleo [12]. Hasta el año 1950 la concentración de CO<sub>2</sub> no superaba los 300 ppm en el ambiente, pero con el incremento de personas e industrias, en la actualidad se cuenta con 416,21 ppm [13].

### **1.3. Parámetros que influyen en la IEQ en edificaciones**

Se deben tomar en cuenta las condiciones del lugar que influyen directamente en el comportamiento de IEQ. Cada lugar tiene condiciones particulares que pueden ser favorables o desfavorables para los ocupantes. Se explicará detalladamente los principales parámetros que influyen en el comportamiento energético de un edificio.

#### **1.3.1. Clima**

El confort térmico se da por la relación entre las condiciones climáticas de un lugar y el nivel de agrado que una persona siente estando en ese clima [14].

Si la infraestructura del lugar no se ha diseñado considerando el clima, se tendrán problemas con respecto al confort térmico. El Ecuador es un país tropical que tiene diversas regiones climáticas debido a algunos factores como la ubicación geográfica, la presencia e interacción de las corrientes oceánicas del Niño y de Humboldt en el océano Pacífico, la variedad topográfica de la cordillera de los Andes y las cadenas montañosas subyacentes, la radiación solar en la zona ecuatorial y la velocidad y dirección de los vientos en la celda de Hadley [15].

El Ecuador tiene cuatro regiones naturales con climas diferenciados, la región Costa, la región Sierra, la región amazónica y la región insular (archipiélago de Galápagos). Adicionalmente se generan microclimas en cada región dependiendo de los factores mencionados anteriormente. El Ecuador presenta dos estaciones climáticas el verano que está comprendido entre los meses de junio a septiembre y el invierno de octubre a mayo

[16], además en los meses de diciembre a febrero se tienen variaciones climáticas con temperaturas elevadas producidas por la corriente oceánica del Niño [17]. La temperatura anual promedio es de 15.6°C [16] y adicionalmente se tienen elevados niveles de radiación solar debido a la incidencia de los rayos solares en la región ecuatorial y la altitud [17].

### 1.3.2. Ubicación Geográfica y orientación

La ubicación geográfica es determinante para influir en la IEQ de un lugar. Cada región cuenta con características demográficas propias que influirán en el nivel de exposición al viento y generación de sombras [18]. Las condiciones meteorológicas se definen según la estación del año, en verano el clima es seco mientras que en invierno el clima es frío y húmedo, además se tiene presencia de lluvias.

La orientación es un factor importante que influye en el comportamiento de la IEQ. Las ganancias internas por radiación solar dependen de como esté orientado el edificio con respecto al movimiento relativo del sol a lo largo del año. Además, un edificio con una orientación adecuada tendrá un mejor aprovechamiento energético de la luz natural [19]. De la misma forma la orientación influye en la incidencia del viento sobre los muros del edificio; en climas fríos la orientación ayuda a tener un mejor aprovechamiento de la energía y a generar un mejor confort térmico [20]. Los diagramas solares son útiles para ver el movimiento del sol a lo largo del año, en la figura 1.2. se muestran los diagramas solares para la ubicación de la EPN, a la derecha se muestra la ubicación del sol en el mes de julio del 2020, mientras que en la imagen de la izquierda se muestra la ubicación del sol en el mes de enero del 2020. El triángulo encerrado en el círculo en la parte inferior izquierda de la imagen muestra la dirección del norte.

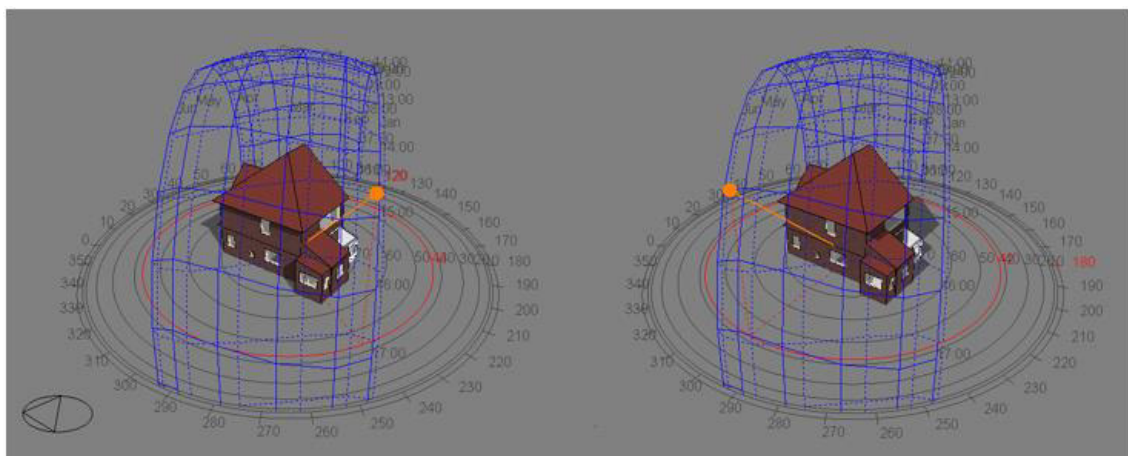


Figura 1. 2. Diagramas solares de la EPN para los meses de enero y julio del 2020.  
(Fuente: Autores)

### **1.3.3. Materiales de Construcción**

Los materiales de construcción influyen en el confort térmico. Un edificio debe diseñarse tomando en cuenta las condiciones climáticas del lugar de tal forma que el confort térmico sea el adecuado. En regiones con climas cálidos los edificios se diseñan con materiales de baja conductividad térmica para prevenir el desconfort por la temperatura del aire caliente del exterior mientras que en regiones con climas fríos el edificio se diseña con techos, paredes, y pisos fuertemente aislados para reducir infiltraciones [21]. De la misma forma la Guía de la Calidad del Aire Interior (*Indoor Air Quality Guide*) publicada por *ASHRAE* recomienda diseñar y construir un edificio tomando en cuenta los detalles del sitio para tener una calidad del aire aceptable [22].

Una definición que se deben tener en cuenta al momento de seleccionar los materiales para la construcción es la inercia térmica la cual es la capacidad que tiene la masa de un material para almacenar energía en forma de calor. La masa térmica se divide en interior y exterior; la masa exterior tiene relación entre el ambiente interior y el ambiente exterior mientras que la masa interna se relaciona con los objetos en el interior del lugar [23]. Esta propiedad es importante ya que reduce la variación del gradiente de temperatura entre el interior y el exterior [24].

Otra definición que se debe tomar en cuenta al momento de seleccionar los materiales es la transferencia de calor por conducción, convección y radiación, para esto se deben analizar sus coeficientes de transferencia de calor respectivos de cada material. Adicionalmente se recomienda pintar las superficies exteriores con pinturas de colores claros o pinturas reflectantes para minimizar las temperaturas superficiales y la transferencia de calor en el edificio en países tropicales [25].

### **1.3.4. Infiltraciones**

Se denomina infiltración a las aberturas y grietas no intencionales que permiten el paso del aire a través de la envolvente de un edificio. Las infiltraciones generan cargas térmicas dependiendo de las condiciones climáticas que generan variaciones en el desempeño energético del edificio. Además, generan efectos de contaminación auditiva y transporte de contaminantes como gases, material particulado, alergénicos y bacterias que se encuentran en la atmósfera y que afectan la IAQ del lugar [22]. Otro problema de las infiltraciones en climas húmedos es la condensación de la humedad en las superficies interiores causando el crecimiento de moho, corrosión y el prematuro deterioro del edificio. Los principales lugares por donde se transfiere aire por infiltraciones son los mostrados en la tabla 1.2.

Tabla 1. 2. Principales vías de infiltraciones.

	1. Ventanas o puertas
	2. Marcos alrededor de las ventanas
	3. Espacios entre uniones de paredes y techos
	4. Espacios entre las esquinas de paredes y techos
	5. Perforaciones para instalaciones eléctricas
	6. Ductos de ventilación en el techo
	7. Extractores de aire en los baños o cocina
	8. Grietas en las instalaciones sanitarias de baños
	9. Grietas en la unión del muro y el suelo
	10. Espacios alrededor de instalaciones eléctricas

(Fuente: [37])

Estudios realizados por *The National Institute of Standards of Technology* han estimado que el 15% de las cargas internas totales en edificios comerciales están determinadas por las infiltraciones mientras que en edificios residenciales hasta el 40% de las cargas internas totales se deben a infiltraciones [26]. Estudios realizados por *ASHRAE* han determinado que el porcentaje de infiltraciones en edificios son las siguientes:

Tabla 1. 3. Porcentaje de infiltraciones.

Porcentaje de infiltración en edificios	
Muros	18% - 50%
Techos	3% - 30%
Sistemas de ventilación	3% - 28%
Ventanas y puertas	6% - 22%
Chimeneas	0% - 30%
Rejillas de ventilación	2% - 12%
Otros	1%

(Fuente: [26])

De igual forma la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) recomienda limitar la cantidad de infiltraciones en climas fríos para reducir la pérdida de calor en espacios interiores [8].

### **1.3.5. Ocupación y actividad**

El número de ocupantes es fundamental para determinar las ganancias internas de calor que tendrá un espacio y de igual forma como la IAQ. El cuerpo humano tiene interacciones térmicas con el ambiente a su alrededor, en la mayoría de los lugares acondicionados naturalmente se generarán pérdidas de calor sensible y calor latente en el cuerpo de la persona, lo que producirá discomfort en los ocupantes [7].

La actividad se refiere al conjunto de acciones que realizan los ocupantes en un periodo de tiempo, las ganancias de energía por transferencia de calor y la tasa de generación de CO<sub>2</sub> de los ocupantes dependerán del conjunto de actividades que estos estén realizando en un periodo de tiempo. *ASHRAE Handbook* define las tasas metabólicas típicas para algunas actividades continuas en unidades *met*, dependiendo del tipo de actividad las unidades *met* varían, por ejemplo, una persona que se encuentra durmiendo genera una tasa metabólica de 0.7 *met* y una persona que se encuentra caminando tiene una tasa metabólica de 1.7 *met* [7].

## **1.4. Normativa referente a IEQ**

La *ASHRAE* ha establecido las normas y las guías para el mejoramiento de la calidad del aire interior en edificaciones y residencias modernas estableciendo una serie de recomendaciones y procedimientos para el diseño y construcción de edificaciones con referencia a la ventilación natural y los sistemas de ventilación y aire acondicionado. También incluye normativa de IAQ referente a calidad del aire y confort térmico.

Las principales normas que se utilizarán en este estudio son:

### **1.4.1. *ASHRAE Handbook Fundamentals 2017***

Cubre los principios básicos y esenciales usados en *HVAC & R industry (Heating, ventilation and air conditioning & industrial refrigeration)*. Comprende 40 apartados, de los cuales se ha considerado todo el conjunto referente a *Indoor Environment Quality* (F09, F10, F11, F12, F13) y el capítulo 16 correspondiente a *Ventilation and Infiltration*.

### **1.4.2. *ASHRAE Standard 62.1-2019, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality***

Especifica el índice mínimo de ventilación en edificios nuevos y existentes que están destinados a proporcionar IAQ aceptable para los ocupantes y que minimice efectos negativos sobre la salud de los mismos. De la misma forma define los requerimientos para el diseño, instalación, comisionamiento, operación y mantenimiento de los sistemas de ventilación y aire acondicionado; requerimientos para la ventilación relacionados con el

ambiente interior y exterior; procesos y recomendaciones para la construcción; recomendaciones para el control de humedad; recomendaciones de tasas de ventilación por unidad de aire en edificios y cálculos de la eficiencia de la velocidad de ventilación y la eficacia de la distribución del aire en la zona. También muestra directrices para el cálculo del diseño de residencias y edificios para que tengan una ventilación natural aceptable y relaciones entre la ventilación natural con la calidad del aire interior y exterior [5].

#### **1.4.3. ASHRAE Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**

La cual especifica las condiciones del ambiente interior y los factores personales que producirán condiciones ambientales aceptables para los ocupantes. De la misma forma se utilizará la Guía de la Calidad del Aire Interior (*Indoor Air Quality Guide*) publicada por ASHRAE dado que contiene un conjunto de consideraciones de IAQ para el diseño, construcción, puesta en marcha y mantenimiento de las edificaciones comerciales e institucionales que engloba la norma ASHRAE Standard 62.1.

#### **1.4.4. NEC 11 Capítulo 13, Norma Ecuatoriana de la Construcción: Eficiencia energética en la construcción en Ecuador**

Establece especificaciones técnicas para diseño, construcción y mantenimiento de edificaciones para reducir el consumo energético de lugares residenciales.

### **1.5. Software**

*DesignBuilder* es un software útil para realizar simulaciones energéticas y de calidad del aire interior en edificios. Es una herramienta de simulación que cuenta con un modelador 3D útil para crear modelos, este funciona con una estructura de 9 módulos que sirven para desarrollar tareas específicas como: visualización, simulación, optimización, costo, iluminación, *heating ventilation and air conditioning (HVAC)*, *scripting* (lenguaje de programación), *LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)* y *computational fluid dynamics (CFD)*. En la simulación energética y calidad de aire interior incorpora *EnergyPlus* como software motor. En el Anexo 8, se muestra la interfaz de *DesignBuilder*, opciones de edición, método de simulación de *DesignBuilder* y la ejecución de un nuevo proyecto que incluye de manera explicativa (paso a paso) las configuraciones personalizadas del software en el proyecto de simulación de esta tesis.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Instrumentos de medición de IEQ**

#### **2.1.1. Selección de los equipos**

La contaminación ambiental es un problema de todo tiempo, donde su contaminante principal interior es el CO<sub>2</sub>. La toma de medidas se ha focalizado en medir las partículas por millón (ppm) de CO<sub>2</sub> en el ambiente interior, con variables que lo modifican o que pueden incidir directa e indirectamente sobre este; como son: el número de ocupantes, las temperaturas interiores y exteriores, humedad relativa y la nubosidad e incidencia del sol sobre el lugar analizado.

El equipo usado para la toma de medidas es Extech CO240, el cual tiene la capacidad de medir dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), humedad relativa (HR), temperatura de bulbo seco [TBS], temperatura de bulbo húmedo (TBH) y punto de rocío (PR). Extech CO240 es usado por investigadores de artículos publicados en la editorial *ELSEVIER* y la revista *Building and Environment*. Específicamente este equipo fue usado en mediciones de la calidad del aire interior en escuelas del País de Kuwait (Medio Oriente), cuyos resultados se exponen en el paper [28].

Las ventajas concernientes a software y hardware con respecto a otros equipos que se venden en el mercado al mismo costo hacen que el equipo Extech CO240 sea conveniente para el desarrollo de la tesis. Se enfatiza la selección en la precisión y resolución del equipo y el rango de medición del CO<sub>2</sub> debido a que es complicado encontrar un equipo que mida hasta 10000 ppm a precio accesible. Sin embargo, este equipo cumple con las necesidades mencionadas.

Se observa que el rango de medición de CO<sub>2</sub> (0-9999ppm) es suficiente para la evaluación de esta variable en ambientes interiores de la EPN. Según estudios de aire interior realizados en escuelas urbanas de países productores de gas y petróleo y con mayor número de muertes atribuibles a la contaminación del aire; el valor mínimo de CO<sub>2</sub> medido fue de 595 ppm y el valor máximo de 3732 ppm (Mahmoud,2017), en las condiciones de número de estudiantes (16-29). De acuerdo a estos valores y antecedentes en la FIM concerniente a mediciones de CO<sub>2</sub> (se encontró hasta 5000 ppm) se puede concluir que Extech CO240, es un equipo seleccionado apto para las mediciones.



### 2.1.2. Análisis estadístico de los datos de IEQ en la ciudad de Quito

Los equipos están diseñados para su funcionamiento óptimo a condiciones a nivel del mar. Dado el hecho de que las mediciones serán realizadas en la ciudad de Quito con altitud de 2800 msnm; por motivo de comprobar la veracidad de las medidas y el porcentaje de error del mismo se procede a realizar la verificación del Extech CO240 tanto para TBS, TBH y HR.

La verificación se realiza con respecto a un patrón de referencia calibrado por un ente autorizado. En este caso, la toma de medidas para verificación se hace con respecto al psicrómetro disponible en el laboratorio de termodinámica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

La toma de medidas se realiza durante cuatro días consecutivos, en horas de la mañana (9 a.m.), en horas de la tarde (2 p.m.) y en horas de la noche (6 p.m.). En todos los casos durante una hora y media (1 hora, 30 min) en intervalos de 5 minutos entre cada medición. Se hace la toma en horas específicas para obtener medidas en un rango de temperatura que se dan en la ciudad de Quito (17°C - 25°C aprox.) para su posterior análisis de errores y comparación. La figura 2.1. muestra el equipo Extech CO240 y el psicrómetro.



Figura 2. 1. Extech CO240 y Psicrómetro.  
(Fuente: Autores)

### Estadística descriptiva

Se utilizará la estadística descriptiva para conocer la distribución, variabilidad y frecuencia de los datos de IAQ de forma inteligible, las herramientas estadísticas que se utilizarán son:

- Gráfico de dispersión: Se utilizará para relacionar los datos de IEQ con el tiempo referente a los periodos de medición y simulación; adicionalmente el diagrama es útil para observar picos mínimos, máximos y tendencia de los datos.

- Histograma: Es una gráfica que sirve para analizar frecuencias relativas de un conjunto de datos en determinados intervalos de clase, estos gráficos permitirán comprender la naturaleza de la población de las variables de IEQ así como un diagnóstico de la posible distribución de probabilidad a la cual se asemejen los datos tratados.
- Diagrama de Cajas y Bigotes: Se utilizará para interpretar y conocer si existen valores atípicos dentro de los datos de IAQ así como algunos parámetros estadísticos como la mediana que se representa como la línea que está en el medio del diagrama, los valores extremos que se representan como los valores más alejados de la mediana, el cuartil superior que es el rango donde se ubican el 75% de los valores y el cuartil inferior que es rango donde se ubican el 25%; el cuartil superior e inferior se representan en las líneas que delimitan la caja.
- Regresión lineal simple y correlación: Se utilizará para determinar el grado de relación que hay entre los datos medidos con el equipo Extech CO240 y los datos medidos con el psicrómetro durante la prueba realizada para la verificación del equipo en las condiciones psicrométricas de Quito. Este método se lo realiza para conocer la relación de forma tal que se puede entender la naturaleza de la relación.

### **Estadística comparativa**

La estadística comparativa proporciona herramientas gráficas y analíticas para comparar dos muestras de datos. Las herramientas gráficas son especificadas en el punto anterior, mientras que las analíticas son indicadores de comparación. A continuación, se muestra los indicadores analíticos que describen la relación entre las dos muestras de datos que se desea analizar.

En el desarrollo del proyecto de titulación es necesario hacer los siguientes análisis:

Análisis comparativo de los datos medidos con el Extech CO240 y psicrómetro en la ciudad de Quito.

Análisis estadísticos de los datos obtenidos con el medidor de IEQ CO240 en las dependencias de la EPN con los valores simulados.

### **Indicadores estadísticos de comparación para los datos de IEQ en la ciudad de Quito y validación del modelo de IEQ en la Biblioteca Central de la EPN**

Para el presente estudio se utilizan indicadores estadísticos de dispersión. Los indicadores que muestran variación, igualdad o similitud, así como sobreestimación entre dos muestras de datos son: la raíz del error cuadrático medio (RMSE), error absoluto medio (MAE), mean

bias error (MBE) y el coeficiente de determinación (R-cuadrado) [31]. Estos serán utilizados para realizar un análisis comparativo entre los datos medidos por el equipo Extech CO240 en la ciudad de Quito y para validar el modelo de IEQ en la Biblioteca Central de la EPN. Para el análisis estadístico de los datos medidos por el equipo Extech CO240 se utiliza estadística descriptiva (diagrama de dispersión, diagrama de cajas y bigotes) y comparativa (índices estadísticos). Para la validación del modelo de confort térmico se utiliza la recomendación de *ASHRAE Guideline 2002* [38] y para la validación del modelo de IAQ la recomendación de Veeresamy [29] y Willmott [30].

### **RMSE (Raíz del error cuadrático medio)**

El estadístico muestra la desviación estándar existente entre los datos medidos respecto a los teóricos, al cual se lo denomina error. En el presente trabajo el RMSE es útil para estimar la veracidad de las mediciones realizadas con el equipo Extech CO240 respecto al psicrómetro en la ciudad de Quito y también para evaluar los resultados obtenidos del modelo simulado en Design Builder respecto al valor de IEQ medido en las dependencias de la EPN.

Se conoce que cuando menor es el RMSE, las medidas tomadas y el modelo simulado se acerca al valor real. Un modelo representativo simulado debe tener valores de RMSE menores al 30% para confort térmico según *ASHRAE Guideline 2002* [38] y también menores al 30% para validación de CO<sub>2</sub> Veeresamy [29].

A continuación, se muestran las fórmulas para su cálculo:

Estadística comparativa para los datos medidos con el equipo Extech CO240 y psicrómetro en la ciudad de Quito.

$$RMSE [u] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{Extech,i} - X_{psci,i})^2} \quad (2.1.)$$

$$RMSE [\%] = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{Extech,i} - X_{psci,i})^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{psci,i}^2}} * 100\% \quad (2.2.)$$

Donde:

$X_{Extech,i}$  = dato medido con el equipo Extech CO2 240

$X_{psci,i}$  = dato medido con el psicrómetro

$n$  = número de datos

Estadística comparativa para los datos simulados en el software Design Builder y el equipo Extech CO240 en la Biblioteca Central de la EPN.

$$RMSE [u] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{simulados,i} - X_{reales,i})^2} \quad (2.3.)$$

$$RMSE [\%] = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{simulados,i} - X_{reales,i})^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{reales,i}^2}} * 100\% \quad (2.4.)$$

Donde:

$X_{simulado,i}$  = dato simulado en Design Builder

$X_{reales,i}$  = dato real medido en la dependencia

$n$  = número de datos

### MAE (Error medio absoluto)

El estadístico MAE muestra el error absoluto entre dos conjuntos de datos y mide la desviación de los datos medidos respecto a los teóricos mediante la diferencia de las dos magnitudes en estudio [30]. Al igual que RMSE se considera ajustado a la realidad un modelo con MAE en el rango de [0% - 30%] y se aplica de igual forma para el caso de dos conjuntos de datos en cuestión. A continuación, se muestran las fórmulas de MAE [31].

Estadística comparativa para los datos medidos con el equipo Extech CO240 y psicrómetro en la ciudad de Quito.

$$MAE [u] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{Extech,i} - X_{psci,i}| \quad (2.5.)$$

$$MAE [\%] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{Extech,i} - X_{psci,i}}{X_{psci,i}} \right| * 100 \quad (2.6.)$$

Donde:

$X_{Extech,i}$  = dato medido con el equipo Extech CO2 240

$X_{psci,i}$  = dato medido con el psicrómetro

$n$  = número de datos

Estadística comparativa para los datos simulados en el software *DesignBuilder* y el equipo Extech CO240 en la Biblioteca Central de la EPN.

$$MAE [\%] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{simulados,i} - X_{reales,i}}{X_{reales,i}} \right| * 100 \quad (2.7.)$$

Donde:

$X_{simulado,i}$  = dato simulado en *Design Builder*

$X_{reales,i}$  = dato real medido en la dependencia

$n$  = número de datos

### MBE (mean bias error)

El estadístico MBE es un indicador de dispersión que provee información de sobreestimación o subestimación de los datos medidos experimentales de IEQ respecto al valor teórico. El resultado proporciona un valor con signo negativo o positivo; un resultado positivo muestra sobreestimación de los datos y un resultado negativo subestimación [32]. Según *ASHRAE Guideline* el modelo de confort térmico se valida en el rango [0% - 10%] [38]. A continuación, se muestran las fórmulas correspondientes:

Estadística comparativa para los datos medidos con el equipo Extech CO240 y psicrómetro en la ciudad de Quito.

$$MBE [u] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{Extech,i} - X_{psci,i} \quad (2.8.)$$

$$MBE [\%] = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{Extech,i} - X_{psci,i})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{psci,i}} * 100 \quad (2.9.)$$

Donde:

$X_{Extech,i}$  = dato medido con el equipo Extech CO2 240

$X_{psci,i}$  = dato medido con el psicrómetro

$n$  = número de datos

Estadística comparativa para los datos simulados en el software *DesignBuilder* y el equipo Extech CO240 en la Biblioteca Central de la EPN.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{simulados,i} - X_{reales,i} \quad (2.10.)$$

$$MBE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{Simulados,i} - X_{reales,i})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{reales,i}} * 100 \quad (2.11.)$$

Donde:

$X_{Simulado,i}$  = dato simulado en Design Builder

$X_{reales,i}$  = dato real medido en la dependencia

$n$  = número de datos

## R- Cuadrado

El estadístico R-cuadrado mide la relación entre dos conjuntos de datos o variables; cuando el valor es cercano a 1, los datos experimentales tienen relación lineal con los valores teóricos. Cuando el valor es mayor o igual a 0,7 se considera que los datos tienen buena relación lineal. En las siguientes formulas se expresa el R-cuadrado con su unidad y en porcentaje [29].

Estadística comparativa para los datos medidos con el equipo Extech CO240 y psicrómetro en la ciudad de Quito.

$$R^2 = \frac{n(\sum_{i=1}^n X_{psci,i} * X_{Extech,i}) - (\sum_{i=1}^n X_{psci,i}) * (\sum_{i=1}^n X_{Extech,i})}{\sqrt{(n * \sum_{i=1}^n X_{psci,i}^2 - ((\sum_{i=1}^n X_{psci,i})^2)) * (n * \sum_{i=1}^n X_{Extech,i}^2 - (\sum_{i=1}^n X_{Extech,i})^2)}} \quad (2.12.)$$

Donde:

$X_{Extech,i}$  = dato medido con el equipo Extech CO2 240

$X_{psci,i}$  = dato medido con el psicrómetro

$n$  = número de datos

Estadística comparativa para los datos simulados en el software DesignBuilder y el equipo Extech CO240 en la Biblioteca Central de la EPN.

$$R^2 = \frac{n(\sum_{i=1}^n X_{sim,i} * X_{reales,i}) - (\sum_{i=1}^n X_{sim,i}) * (\sum_{i=1}^n X_{reales,i})}{\sqrt{(n * \sum_{i=1}^n X_{sim,i}^2 - ((\sum_{i=1}^n X_{sim,i})^2)) * (n * \sum_{i=1}^n X_{reales,i}^2 - (\sum_{i=1}^n X_{reales,i})^2)}} \quad (2.13.)$$

Donde:

$X_{simulado,i}$  = dato simulado en Design Builder

$X_{reales,i}$  = dato real medido en la dependencia

$n$  = número de datos

## 2.2. Definición del lugar

Para la definición del lugar de estudio se deben tomar en cuenta los parámetros que determinan el IEQ, para el presente estudio se escogió la Biblioteca Central de la EPN por la alta afluencia de los estudiantes, el horario de funcionamiento y el espacio para realizar el estudio.

### Clima

El clima de la ciudad de Quito tiene dos estaciones definidas que son el verano y el invierno; el mes en el que se realizaron las mediciones fue el mes de febrero del 2020 en los días 13, 14, 15, 18 y 19. Este mes se encuentra dentro del periodo de invierno sin embargo el clima es influenciado por la corriente oceánica del niño; se registraron temperaturas superiores a los 24°C en algunos días en la estación de SCINERGY de la EPN.

### Ubicación geográfica y orientación

La EPN se encuentra ubicada en la región sierra en el noreste de la ciudad de Quito en las coordenadas 0.2104° sur, 78.4885° este y a una altitud de 2815 msnm, En la figura 2.2. se puede observar que la universidad está rodeada por otros edificios que inciden en la incidencia del viento.



Figura 2. 2. Ubicación de la EPN en la ciudad de Quito.  
(Fuente: Autores)

La biblioteca central de la EPN se encuentra rotada 32° en sentido horario con el norte como eje de referencia. La mayor parte de los edificios de la universidad entre ellos la FIM se encuentran rotados 58° en sentido horario con el norte como eje de referencia. En la

figura 2.3. se puede observar la rotación de los edificios de la biblioteca central y de la FIM, el círculo que encierra al triángulo en la parte inferior izquierda indica la dirección del norte.

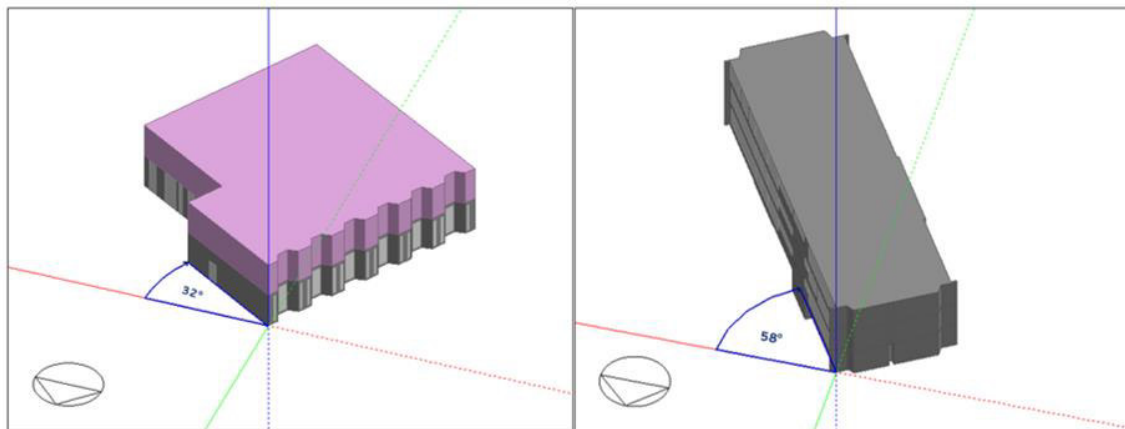


Figura 2. 3. Rotación de los edificios de la Biblioteca Central y la FIM.  
(Fuente: Autores)

### 2.3. Obtención de los datos de IEQ en las dependencias de la EPN

ASHRAE 55-2010, apartado 7, recomienda la posición y localización del sensor para la obtención de datos de confort térmico. El medidor debe ubicarse a 0,60 m de altura sobre el piso para ocupantes sentados, localizado en el centro del área de evaluación. El equipo debe estar ubicado lejos de cualquier superficie para permitir una circulación adecuada alrededor de los sensores de medición [6].

También se recomienda un intervalo de tiempo de medida de cada variable comprendido entre 5 minutos o menos, por tanto, se toma los datos desde las 10 a.m. a 7 p.m. durante al menos tres días a la semana para cada lugar en un intervalo de 5 minutos por medición [34].

Asimismo, se contabiliza el número de personas, ventanas y puertas abiertas durante la medición. Es necesario conocer la vestimenta y actividad de las personas que se encuentran en el lugar para el consecuente análisis de IEQ.

En las dependencias de la EPN los estudiantes usan vestimenta que representa 0,9 clo (valor de aislamiento por ropa expresado en unidades clo) en todos los meses del año y realizan actividades de estudio, lectura y escritura con una generación típica de calor metabólico correspondiente a 1 met [7].

Los resultados de las mediciones experimentales sirven de comparación y validación de los modelos desarrollados en el software *DesignBuilder*, que se aborda en el apartado 3



(análisis de resultados) de este escrito. En el Anexo 2 se muestran las gráficas de los datos obtenidos por el equipo Extech CO240.

## 2.4. Modelado en Design Builder

### 2.4.1. Modelado de la Biblioteca Central en *DesignBuilder*

Para la creación del modelo se utilizaron medidas experimentales de las dimensiones del edificio como también la información de la remodelación de la biblioteca central que se encuentra en la página principal de la EPN. De la misma forma, se utilizó información de edificios similares para consultar detalles de particiones y acabados. Adicionalmente el piso que se encuentra sobre la biblioteca central se dibujó con un bloque de componente adiabático.

El modelo de la biblioteca central se lo construyó con las especificaciones que se muestra en el Anexo 3. El mismo contiene todas las condiciones de simulación y datos de entrada del modelo, además de la configuración paramétrica de funcionamiento del software *DesignBuilder* para el modelo.

Los datos de entrada son obtenidos directamente de fuentes bibliográficas (detallados en la tabla) en algunos casos, en otros son calculados y en otros medidos en el lugar. Se presentan los datos de entrada calculados. La definición de fórmulas se especifica anteriormente.

#### Tasa metabólica de los estudiantes en la biblioteca central

Se halla de acuerdo a la ecuación (1.1.) descrita en el capítulo 1 de este escrito.

$$M_{prom} = f_{reading} * M_{reading} + f_{writing} * M_{writing} + f_{typing} * M_{typing}$$

$$M_{prom} = 0,5 * 55 \left[ \frac{W}{m^2} \right] + 0,25 * 60 \left[ \frac{W}{m^2} \right] + 0,25 * 65 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$M_{prom} = 58,75 \left[ \frac{W}{m^2} \right] * \frac{1met}{58,1 \left[ \frac{W}{m^2} \right]}$$

$$M_{prom} = 1,01 met \approx 1met$$

#### Tasa de generación de Dióxido de carbono por persona (S) considerando la variación de volumen del aire a distintas condiciones de presión y temperatura.

Se considera temperatura media en la ciudad de Quito de 20°C (293 K) y presión igual a 72 Kpa. Se halla la tasa de generación de dióxido de carbono por persona de acuerdo a la ecuación (1.6.).

$$S = BMR * M_{prom} * \left(\frac{T}{P}\right) * 0,000179$$

$$S = 6,531 \left[\frac{MJ}{day}\right] * (1met) * \left(\frac{293 [K]}{72 [Kpa]}\right) * 0,000179$$

$$S = 4,757 \times 10^{-3} \frac{l}{s} * \frac{1m^3}{1000 l}$$

$$S = 4,757 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

### Tasa metabólica basal

De acuerdo a las ecuaciones (1.7.) y (1.8.) se expresan los resultados.

$$BMR_H = 0,063 * 70 [kg] + 2,896 = 7,306 \left[\frac{MJ}{day}\right]$$

$$BMR_M = 0,062 * 60 [kg] + 2,036 = 5,757 \left[\frac{MJ}{day}\right]$$

$$BMR = 6,531 \left[\frac{MJ}{day}\right]$$

### Vestimenta

El aislamiento por vestimenta se mide al considerar la suma de todas las prendas que usa la persona; se calcula un valor para hombres y otro para mujeres y finalmente se promedia para obtener un solo valor, de la siguiente manera. El valor clo por prenda se obtiene de la Tabla 9 *Garment Insulation Values, ASHRAE Fundamentals SI*.

$$I_{cl,man} = I_{clu}brief + I_{clu}socks + I_{clu}shirt + I_{clu}trouser + I_{clu}shoes + I_{clu}sweater \quad (2.14.)$$

$$I_{cl,man} = 0,04 clo + 0,02 clo + 0,34 clo + 0,24 clo + 0,10 clo + 0,22 clo$$

$$I_{cl,man} = 0,96 clo$$

$$I_{cl,woman} = I_{clu}pantie + I_{clu}bra + I_{clu}socks + I_{clu}blouse + I_{clu}trouser + I_{clu}shoes + I_{clu}jacket$$

$$I_{cl,woman} = 0,03 clo + 0,01 clo + 0,06 clo + 0,12 clo + 0,15 clo + 0,10 clo + 0,36 clo$$

$$I_{cl,woman} = 0,83 \text{ clo}$$

$$I_{cl,prom} = 0,90 \text{ clo}$$

### Densidad de potencia por computadoras

Consiste en la potencia que consumen los equipos por unidad de área del suelo en [W/m<sup>2</sup>]. Las ganancias de los equipos de una zona se ingresan como una densidad de potencia.

$$PD = \frac{\sum_{i=1}^n P * n}{A} \quad (2.15.)$$

Donde:

$$PD = \text{densidad de potencia} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$P = \text{potencia de equipo [W]}$$

$$n = \text{número de equipos}$$

$$A = \text{área de la zona}$$

### Biblioteca central:

De acuerdo a la ecuación (2.15.) que se muestra anteriormente.

$$PD = \frac{200 [W] * 3}{208,11 [m^2]}$$

$$PD = 2,88 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

### Densidad de potencia por luminarias

Al igual que el cálculo de densidad de potencia para equipos, se aplica el mismo concepto para densidad de potencia de las luminarias de la biblioteca central, según la ecuación (2.15.).

$$PD = \frac{50 [W] * 36}{208,11 [m^2]}$$

$$PD = 8,65 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Una vez conocida la obtención de datos de entrada calculados, se presenta el modelo 3D de la biblioteca central y su entorno en el software *DesignBuilder*.

### 2.4.2. Descripción de la zonificación de la biblioteca central

El modelo 3D está compuesto de 6 zonas como se muestran en la figura 2.4., en las imágenes siguientes se exponen, la vista axonométrica de la biblioteca central y a continuación la fachada. La fachada que contiene ventanas, 4 que pertenecen a la sala general y las 2 ventanas restantes a la librería. El funcionamiento de las ventanas se expone en el Anexo 3.

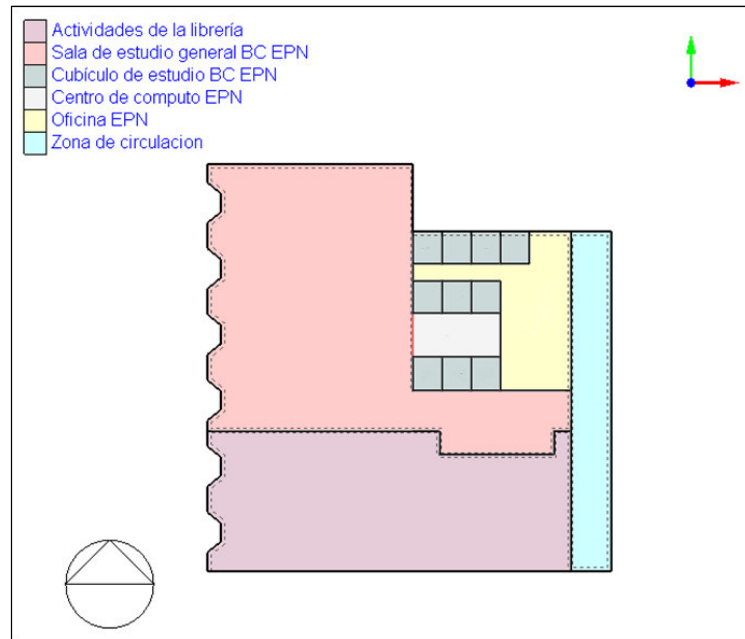


Figura 2. 4. Zonificación en *DesignBuilder* de la Biblioteca Central.  
(Fuente: Autores)

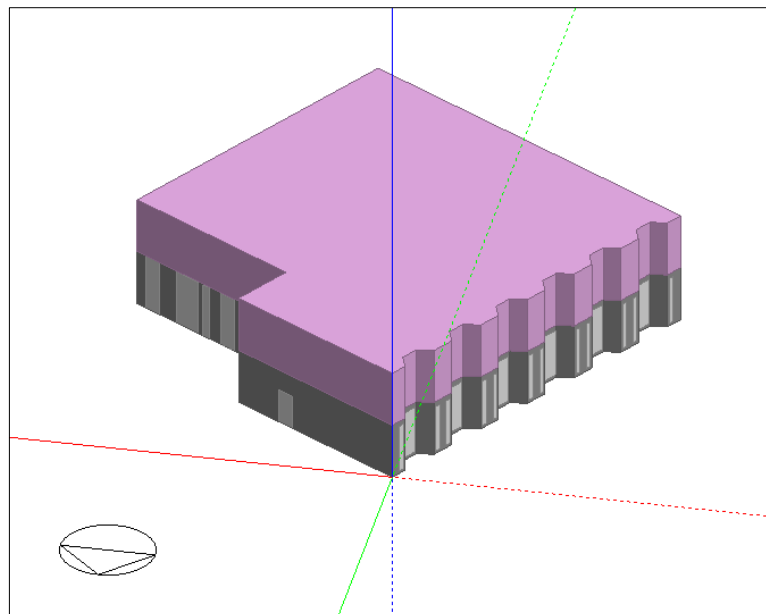


Figura 2. 5. Vista axonométrica de la Biblioteca Central.  
(Fuente: Autores)

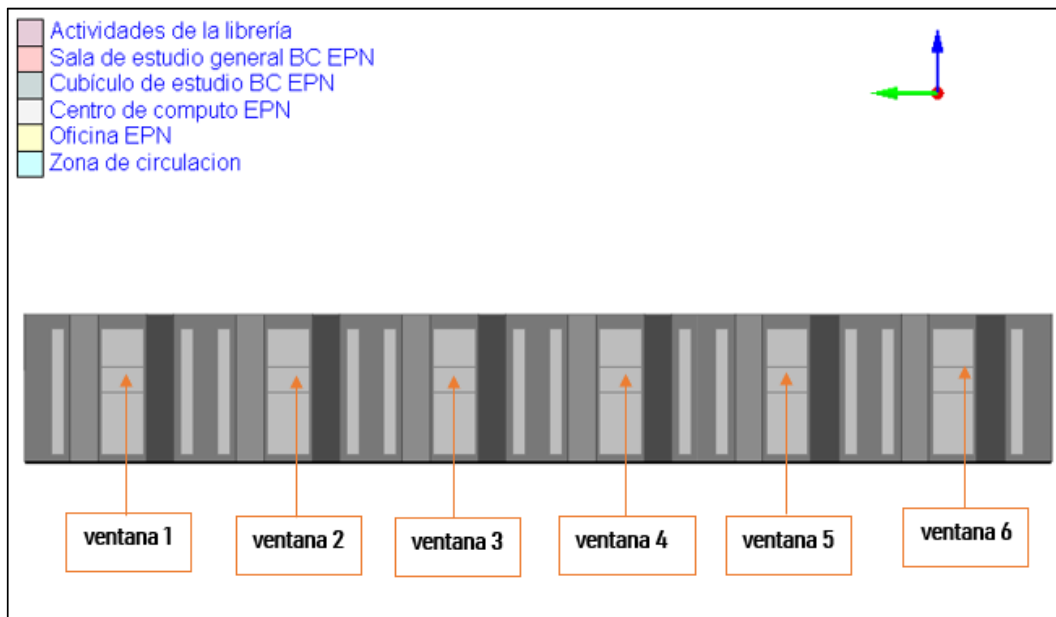


Figura 2. 6. Fachada exterior principal de la Biblioteca Central.  
(Fuente: Autores)

### 2.4.3. Modelado de la Facultad de Ingeniería Mecánica en *DesignBuilder*

El modelo de la FIM se realiza con las especificaciones de configuración del programa y de modelo que se usó para el modelado de la biblioteca central. Las condiciones de funcionamiento y datos de entrada son coincidentes al modelo de la biblioteca central especificados en el Anexo 3.

El modelado 3D del edificio es independiente para cada simulación; se muestra en las gráficas siguientes la vista axonométrica, vista superior y fachada.

Se han dibujado los edificios cercanos a la FIM, que pueden hacer sombra este. La vista axonométrica permite mostrar todo el esquema del lugar.

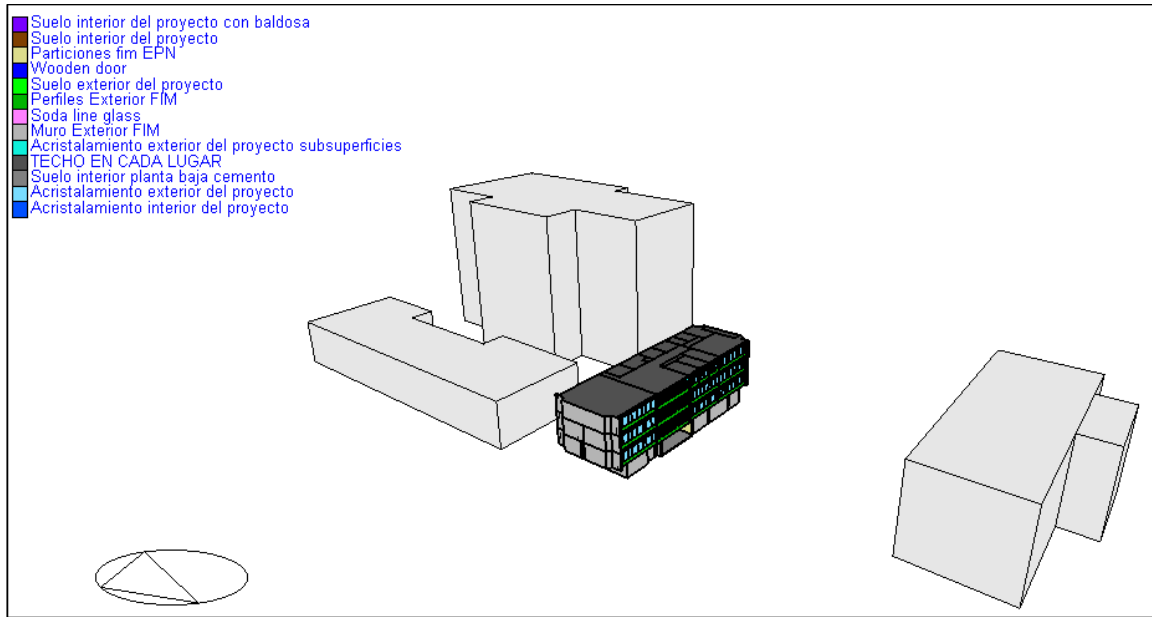


Figura 2. 7. Vista axonométrica en *DesignBuilder* de la FIM.  
(Fuente: Autores)

Se dibuja el edificio de la FIM completo: planta baja, primero, segundo y tercer piso. En este apartado se muestra únicamente el piso 1, tanto la vista de planta y la vista axonométrica. La vista de planta permite observar el nombre de cada zona del piso 1 y la vista axonométrica muestra el material usado para cada cerramiento. Los pisos: planta baja, segundo y tercer piso forman el Anexo 4.

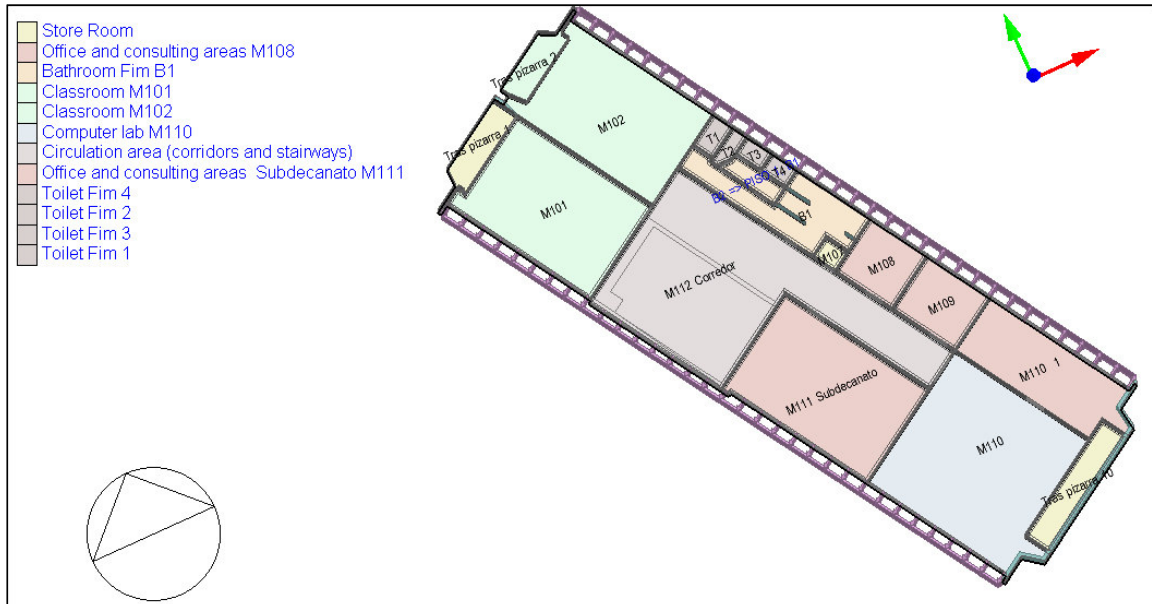


Figura 2. 8. Vista superior del primer piso (zonificación) en *DesignBuilder* de la FIM.  
(Fuente: Autores)

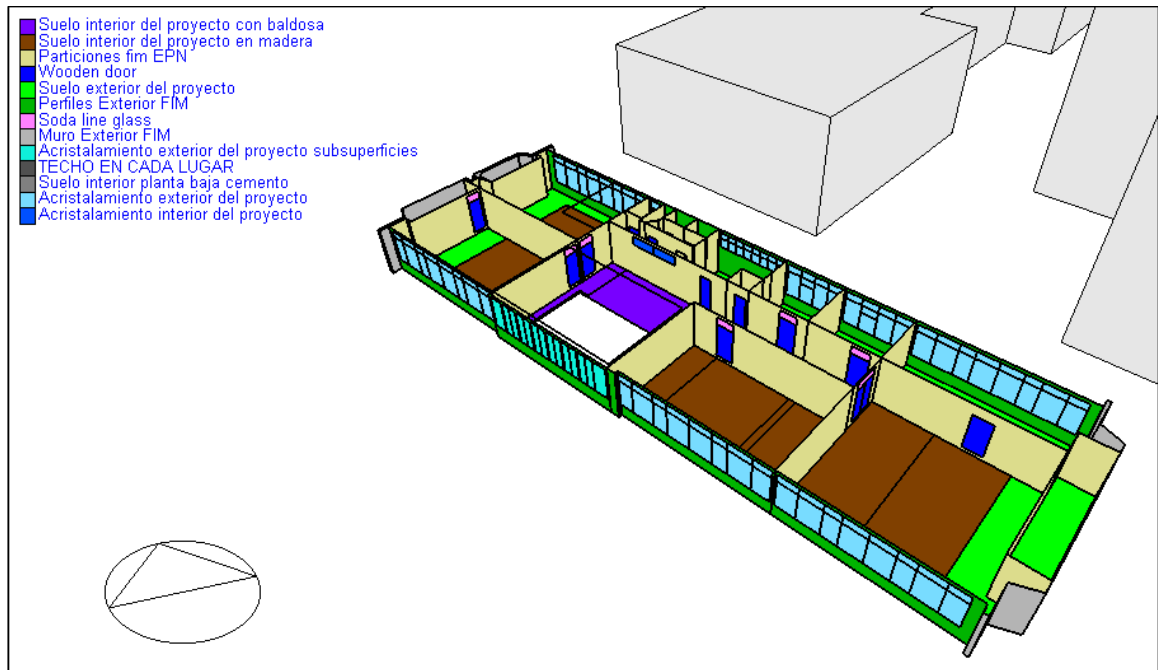


Figura 2. 9. Vista axonométrica del primer piso en *DesignBuilder* de la FIM.  
(Fuente: Autores)

La vista renderizada permite observar el posicionamiento del sol y también las sombras en el edificio. En la gráfica siguiente se muestra el entorno del lugar a las 5 p.m. del día lunes 7 de enero del 2020.

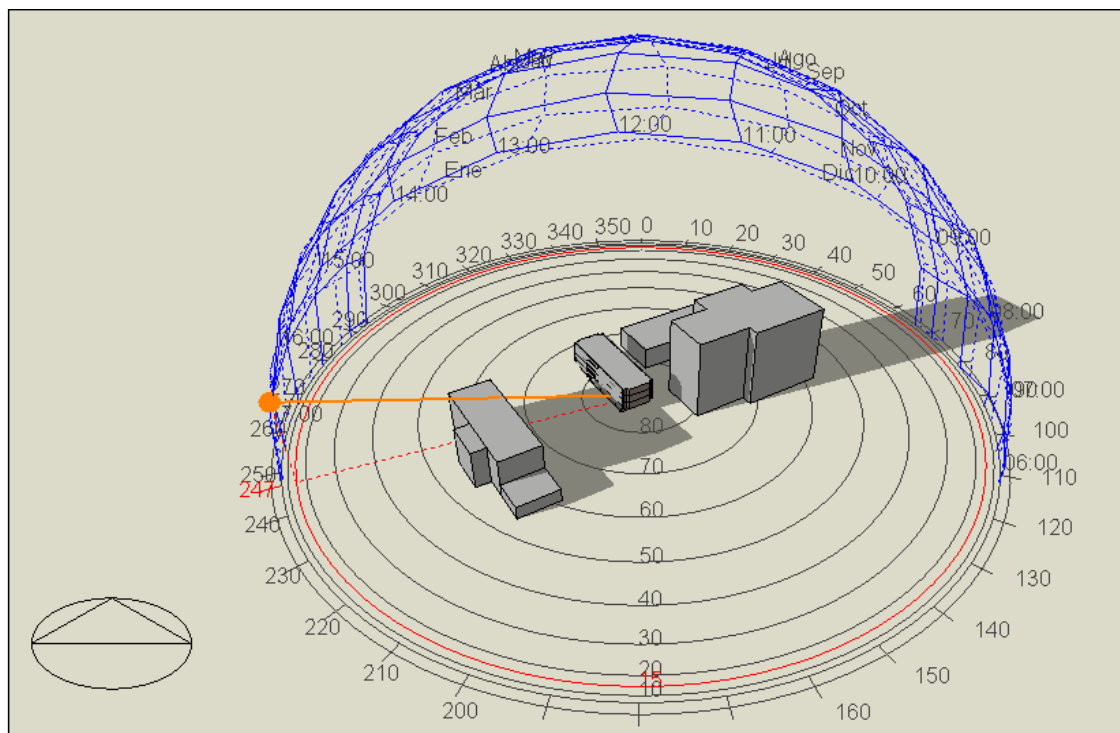


Figura 2. 10. Soleamiento de la FIM en *DesignBuilder*.  
(Fuente: Autores)

#### 2.4.4. Condiciones de simulación del edificio FIM

La ocupación del edificio es un factor particular para definir el confort térmico y el CO<sub>2</sub> en el lugar. Se sitúa por aula el número de ocupantes según la tabla 2.1.

La simulación se realiza en dos condiciones de ocupación: ocupación máxima y ocupación baja. La ocupación máxima corresponde al valor promedio de estudiantes en cada aula durante un semestre en condiciones normales (aulas llenas) y la ocupación mínima se calcula al 25% del número de personas que ocupan el aula en condiciones normales.

Tabla 2. 1. Condiciones de simulación de ocupación de la FIM.

<b>Ocupación máxima para el edificio FIM</b>		<b>Ocupación mínima para el edificio FIM</b>	
Aulas	Número de personas	Aulas	Número de personas
Primer Piso		Primer Piso	
M101	35	M101	9
M102	35	M102	9
M108	2	M108	1
M109	2	M109	1
M110	47	M110	12
M1101	3	M1101	1
M111	6	M111	2
Subdecanato		Subdecanato	
Segundo Piso		Segundo Piso	
M201	40	M201	10
M202	10	M202	3
M203	2	M203	1
M208	2	M208	1
M209	2	M209	1
M210	35	M210	9
M215	35	M215	9
Tercer Piso		Tercer Piso	
M301	70	M301	18
M308	2	M308	1
M309	2	M309	1
M310A	2	M310A	1
M310B	2	M310B	1
M310C	2	M310C	1
M310D	4	M310D	1
M311C	2	M311C	1
M311A	2	M311A	1
M311B	2	M311B	1

(Fuente: Autores)

Por motivo de análisis complementario se considera la variación de ventilación en el edificio, es decir se simula el comportamiento de la FIM en distintos escenarios de ventilación para cada aula.



Se ha propuesto 6 distintos escenarios de ventilación en cada aula, con el objetivo de explicar la variabilidad de la temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> en el sitio y sobre todo la importancia de la ventilación natural en un lugar. La ventilación natural está ligada al número de aberturas del edificio, por tanto, en la tabla 2.2. se explican los escenarios simulados en la FIM.

Tabla 2. 2. Escenarios de simulación para ventilación en alta ocupación.

	Ocupación [%]	Ventanas	Puerta
M1	100	abiertas	abierta
M2	100	abiertas	cerrada
M3	100	2 ventanas abiertas	abierta
M4	100	cerradas	cerrada
M5	100	cerradas	abierta
M6	100	2 ventanas abiertas	cerrada

(Fuente: Autores)

Tabla 2. 3. Escenarios de simulación para ventilación en baja ocupación.

	Ocupación [%]	Ventanas	Puerta
M1	25	abiertas	abierta
M2	25	abiertas	cerrada
M3	25	2 ventanas abiertas	abierta
M4	25	cerradas	cerrada
M5	25	cerradas	abierta
M6	25	2 ventanas abiertas	cerrada

(Fuente: Autores)

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. Análisis estadístico de los resultados del equipo Extech CO240 en Quito.

Las 146 mediciones realizadas para del equipo Extech CO240 en la ciudad de Quito para cada una de las variables (TBS, TBH y HR) se presentan en un gráfico de dispersión, histogramas y diagrama de caja y bigotes.

##### 3.1.1. Análisis estadístico TBS Psicrómetro y TBS Extech

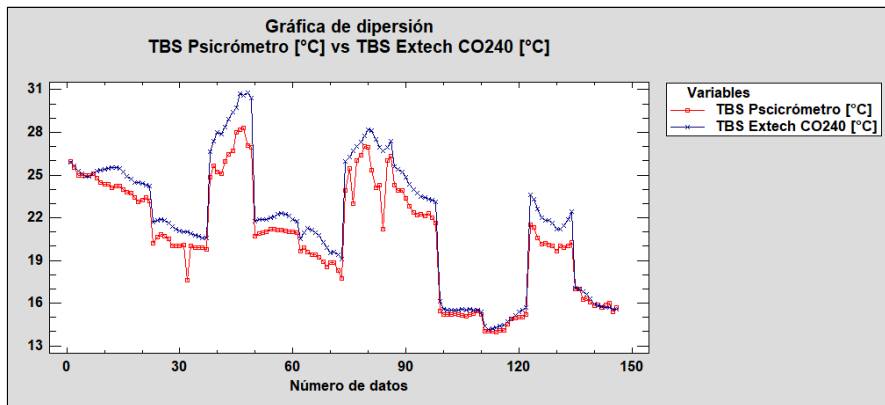


Figura 3. 1. TBS Psicrómetro [°C] y TBS Extech CO240 [°C].  
(Fuente: Autores)

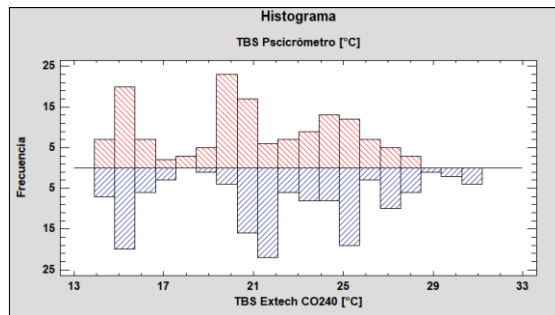


Figura 3. 2. Histograma de TBS Psicrómetro [°C] y TBS Extech CO240 [°C].  
(Fuente: Autores)

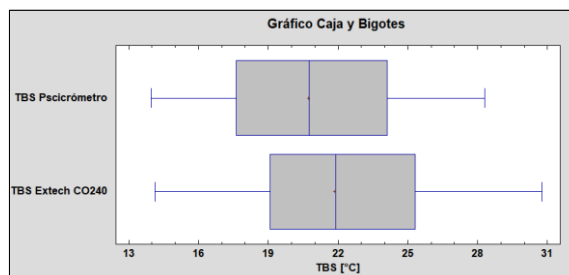


Figura 3. 3. Gráfico de caja y bigotes de TBS Psicrómetro [°C] y TBS Extech CO240 [°C].  
(Fuente: Autores)

La figura 3.1. muestra que la tendencia de las mediciones realizadas por el equipo Extech CO240 y Psicrómetro para TBS son similares. La curva del psicrómetro presenta datos extremos leves que se muestran como discontinuaciones abruptas en la curva. El diagrama de caja y bigotes de la figura 3.3. determina que las mediciones del Extech CO240 tienen mayor dispersión que el psicrómetro, esta característica se observa de acuerdo al tamaño de la gráfica. Dado que la mediana, cuartiles y bigotes de la caja son mayores que el patrón de referencia se sabe que el equipo en evaluación toma medidas elevadas respecto al psicrómetro. El histograma de la figura 3.2. señala que la medida más frecuente (23 veces) tomada por el psicrómetro está en el rango de 19,5 °C a 20°C mientras que para el Extech CO240 está en el rango de 21 °C a 22°C.

### 3.1.2. Análisis estadístico TBH Psicrómetro y TBH Extech

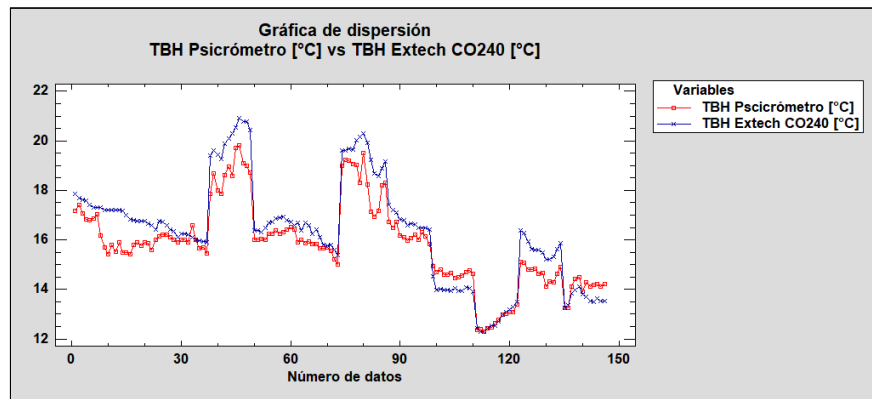


Figura 3. 4. TBH Psicrómetro [°C] y TBH Extech CO240 [°C].  
(Fuente: Autores)

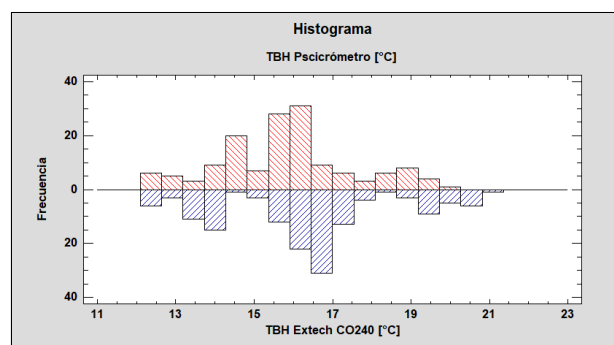


Figura 3. 5. TBH Histograma de TBH Psicrómetro [°C] y TBH Extech CO240 [°C].  
(Fuente: Autores)

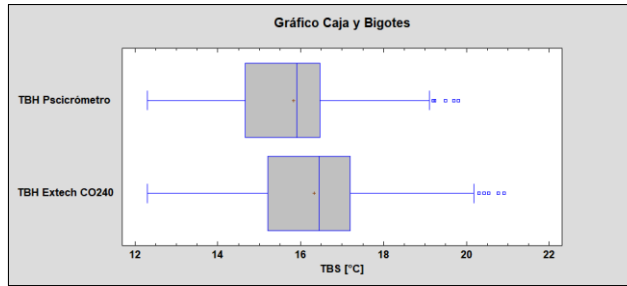


Figura 3. 6. Gráfico caja y bigotes de TBH Psicrómetro [°C] y TBH Extech CO240 [°C].  
(Fuente: Autores)

La figura 3.4. muestra los datos medidos con los equipos en cuestión, al igual que el caso de TBS, los dos conjuntos de muestras de TBH tienen tendencia similar. Se observan 4 valores atípicos no aceptables expuestos en los diagramas de caja y bigotes (figura 3.6); estas mediciones atípicas son provocadas por sucesos repentinos en el entorno de medición. Cuando una persona se acerca excesivamente al equipo, variaciones bruscas de velocidad del aire o cuando se acerca equipos radiantes de calor; todos estos cuando suceden en un instante de tiempo corto se consideran actividades repentinas. Los valores atípicos son valores erróneos. El histograma de la figura 3.5. muestra que la medida más frecuente (30 veces) tomada por el psicrómetro está en el rango de 16°C a 16,5°C mientras que para el Extech CO240 está en el rango de 16,5°C a 17°C. Las medidas tomadas con el equipo medidor de IAQ son mayores a las del psicrómetro.

### 3.1.3. Análisis estadístico HR Psicrómetro y HR Extech

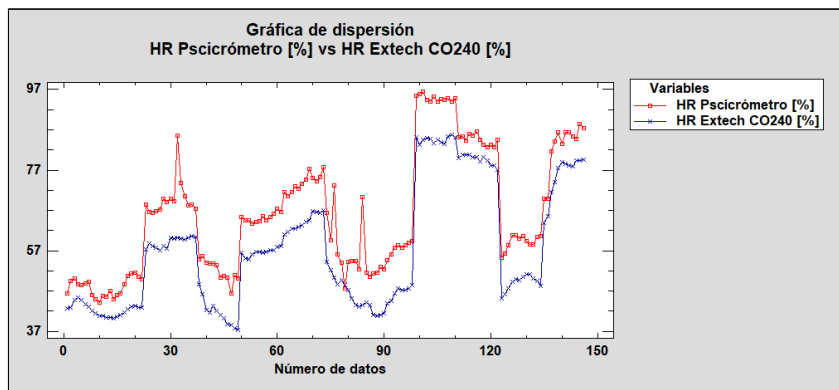


Figura 3. 7. HR Psicrómetro [%] y HR Extech CO240 [%].  
(Fuente: Autores)

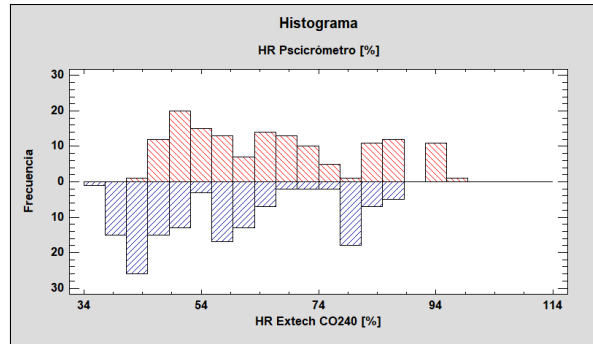


Figura 3. 8. Histograma de HR Psicrómetro [%] y HR Extech CO240 [%].  
(Fuente: Autores)

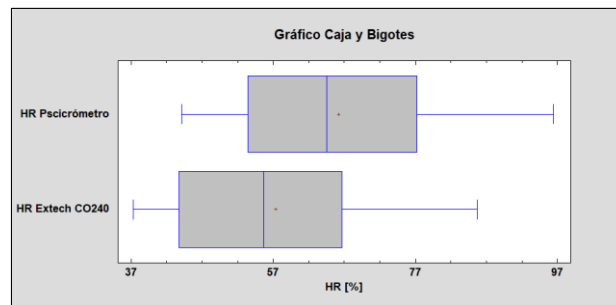


Figura 3. 9. Gráfico de caja y bigotes de HR Psicrómetro [%] y HR Extech CO240 [%].  
(Fuente: Autores)

La figura 3.7. señala que los datos medidos con Extech CO240 son menores a los tomados con el psicrómetro; la tendencia es similar. Se observan valores extremos que dibujan una curva discontinua, sin embargo son aceptables porque se posicionan en los bigotes de la gráfica (figura 3.9.) y a diferencia de la TBH, en el caso de humedad relativa no existen valores atípicos. El histograma de la figura 3.8. muestra que la medida más frecuente (20 veces) tomada por el psicrómetro está en el rango de 50% a 54% mientras que para el Extech CO240 está en el rango de 40% a 54%, lo que indica que las mediciones oscilan con mayor frecuencia en estos valores.

### 3.1.4. Indicadores estadísticos para el equipo Extech

Después de hacer un análisis gráfico es necesario usar los indicadores estadísticos para determinar si el Extech CO240 trabaja correctamente a las condiciones meteorológicas de la ciudad de Quito. Los indicadores RMSE, MAE, MBE y R cuadrado permiten conocer de manera determinante el error del equipo respecto al patrón de referencia. En la tabla 3.1. se expone los resultados para las tres variables de estudio.

Tabla 3. 1. Índices estadísticos de comparación de datos tomados por Extech CO240 y psicrómetro.

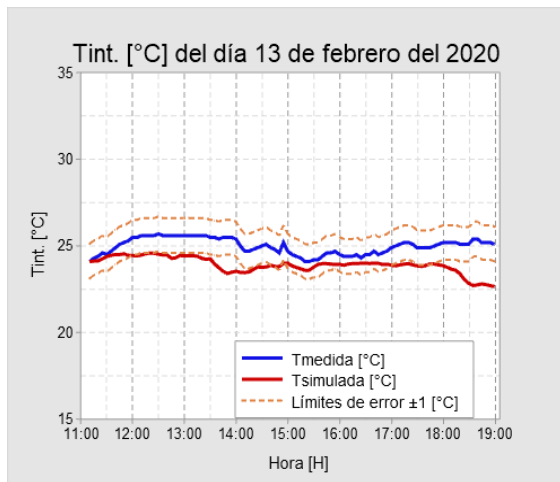
	TBS	TBH	HR
RSME [%]	6,84	5,25	14
MAE [%]	5,22	4,25	13,79
MBE [%]	5,43	3,19	-13,34
R cuadrado	0,97	0,93	0,95

(Fuente: Autores)

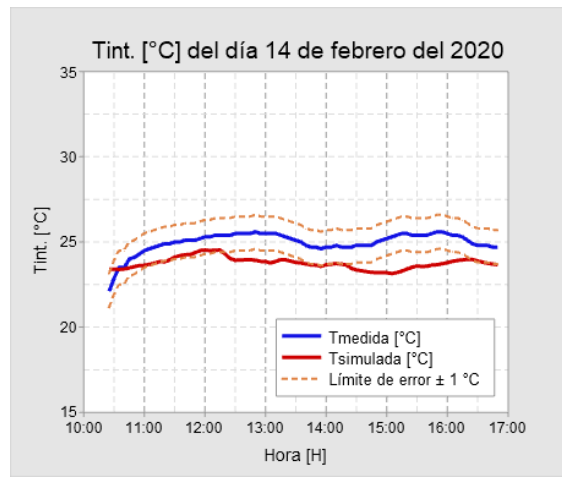
En las tres variables analizadas los valores calculados se encuentran dentro del rango permitido según ASHRAE Guideline 2002 [38] y Veeresamy [29] . Tanto el RMSE y MAE son menores al 30% y el R cuadrado es cercano a 1 lo que indica una relación fuerte entre las variables medidas en el Extech CO240 y psicrómetro. El MBE indica que para TBS y TBH los valores medidos con Extech CO240 son mayores que los valores del patrón de referencia, tal como se muestra en el análisis gráfico. En el caso de HR el MBE es negativo lo que indica que los valores del Extech CO240 son menores al del psicrómetro como indica el análisis gráfico. Por tanto, se concluye que las medidas tomadas por Extech CO240 y psicrómetro en la ciudad de Quito se relacionan fuertemente con R cuadrado mayor a 0,95 y con error relativo absoluto menor al 10% en TBH y TBS y error menor al 14 % en HR. De acuerdo al análisis el equipo comprado Extech CO240 es apto para las mediciones en las dependencias de la EPN.

### **3.2. Resultados de las mediciones de IEQ en la Biblioteca Central y análisis comparativo con las simulaciones en *DesignBuilder***

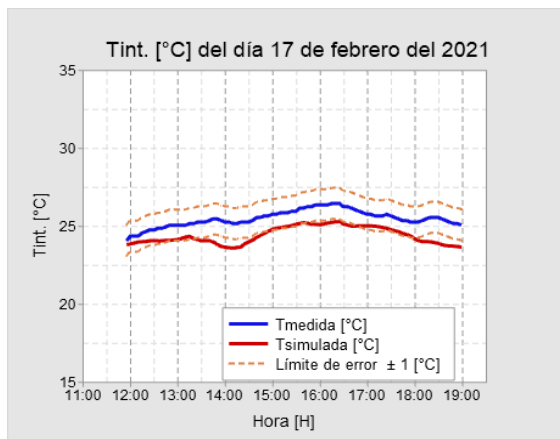
La comparación entre datos medidos y simulados es necesaria para validar los resultados que el software genera a las condiciones dadas. En las siguientes figuras 3.10, 3.11. y 3.12. se muestran las gráficas de dispersión de T, HR y CO<sub>2</sub> que incluyen límites de error que el equipo de medición puede cometer. Cuando la curva de simulación se encuentra dentro de este rango se sospecha que el modelo representa la realidad, sin embargo, se debe analizar analíticamente con los valores de RMSE, MAE y MBE para mayor confiabilidad. También se muestra las gráficas de caja y bigotes que aportan información complementaria al análisis de datos (Anexo 5).



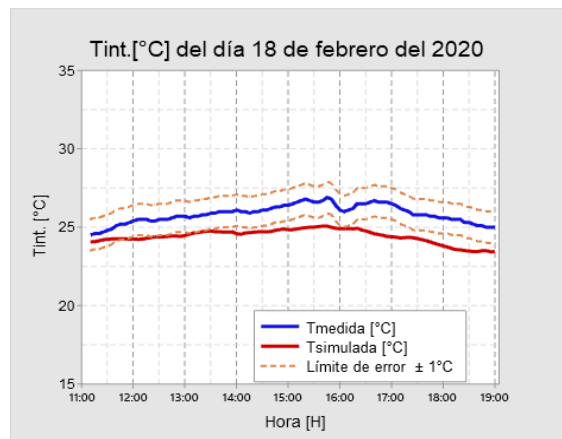
(a)



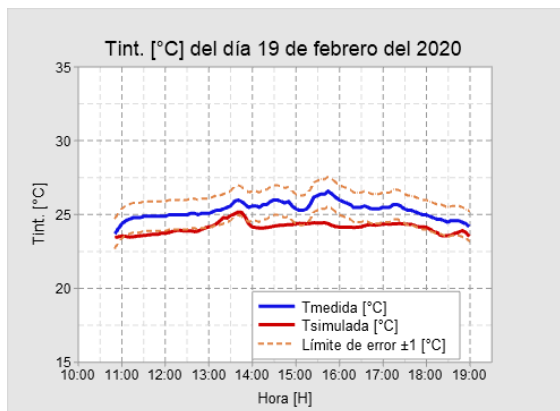
(b)



(c)

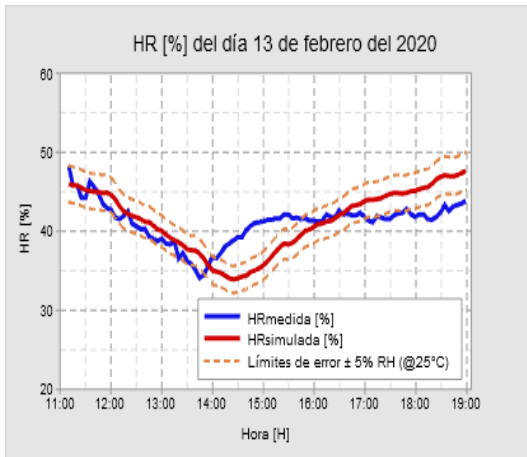


(d)

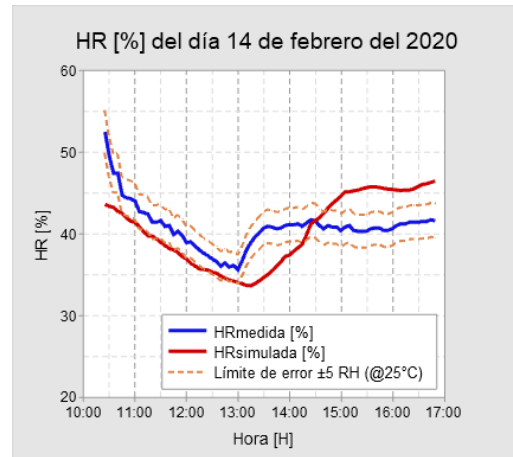


(e)

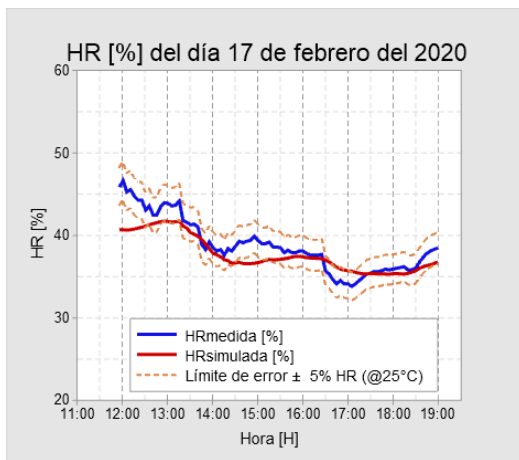
Figura 3. 10. Gráficas de dispersión de Tint. seca [°C] medida vs Tint. seca [°C] simulada para los días 13-feb (a), 14-feb (b), 17-feb (c), 18-feb (d), 19-feb (e) en la Biblioteca central de la EPN. Se indican los límites de error del equipo de medición con las líneas a trazos.  
(Fuente: Autores)



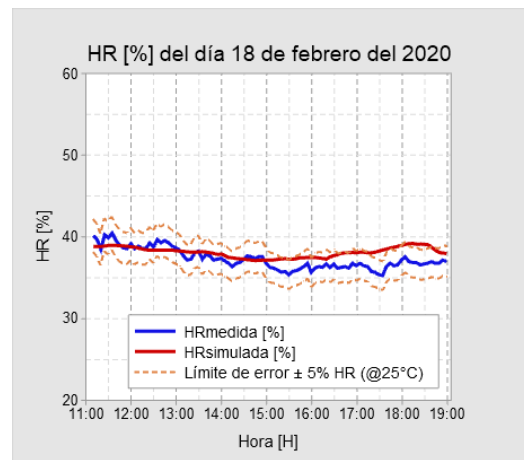
(a)



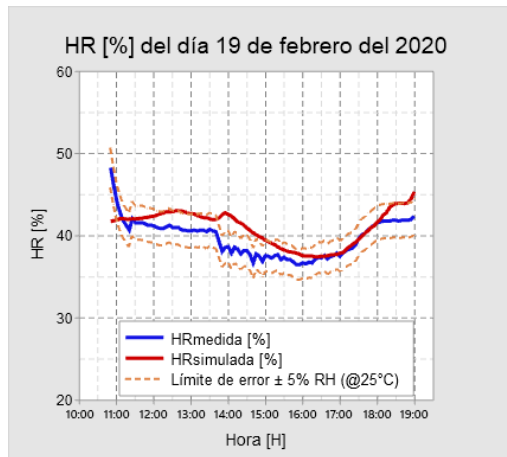
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.11. Gráficas de dispersión de HR [%] medido vs HR [%] simulado para los días 13-feb (a), 14-feb (b), 17-feb (c), 18-feb (d), 19-feb (e) en la Biblioteca central de la EPN. Se indican los límites de error del equipo de medición con las líneas a trazos.

(Fuente: Autores)



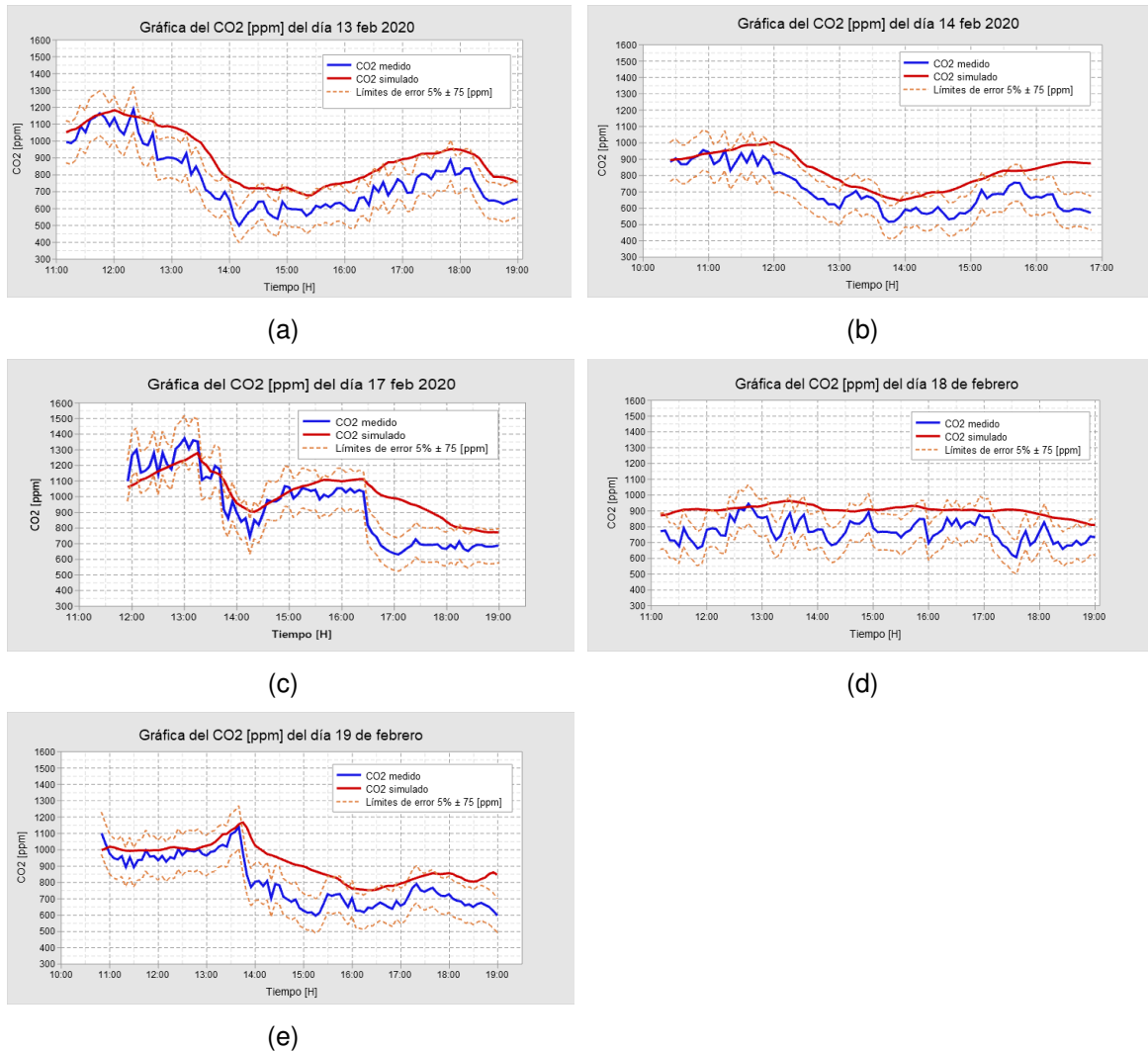


Figura 3.12. Gráficas de dispersión de CO<sub>2</sub> [ppm] medido vs CO<sub>2</sub> [ppm] simulado para los días 13-feb (a), 14-feb (b), 17-feb (c), 18-feb (d), 19-feb (e) en la Biblioteca central de la EPN. Se indican los límites de error del equipo de medición con las líneas a trazos.  
(Fuente: Autores)

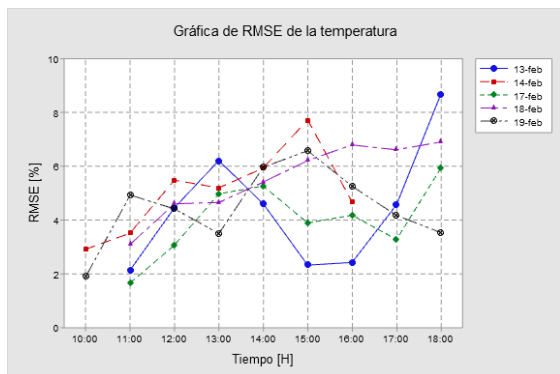
Las gráficas de dispersión muestran que las curvas simuladas de temperatura siguen la tendencia de los datos medidos y se encuentran entre el valor límite de error. Sin embargo, los máximos y mínimos en algunas zonas de las curvas salen de las líneas referenciales de error mínimo; por tanto, los resultados simulados están subestimados (como se observa en el diagrama de cajas y bigotes de la figura V.1. Anexo 5). Los resultados dibujan una línea curva continua sin cambios bruscos repentinos contrario a como se observa en la curva de datos medidos. Esta curva continua se debe a que los parámetros de simulación del software consideran que la temperatura es uniforme en el lugar, no presenta estancamiento del aire en cada cuarto, desprecia el efecto del impulso del aire al ingresar a cada zona y considera distribución uniforme de la presión hidrostática en cada zona de simulación. Por tanto, cabe destacar que en la realidad la temperatura del aire cercano a

la envolvente del edificio no es igual a la temperatura del centro del lugar sin embargo el software considera que sí lo es; Por tal razón, los resultados simulados son disímiles en cierto porcentaje respecto a los medidos experimentalmente. La gráfica de caja y bigotes (figura V.1. Anexo 5) de la temperatura también muestra que las medianas de los datos simulados en cada día son menores respecto a la mediana de los valores medidos, lo que significa subestimación de los datos.

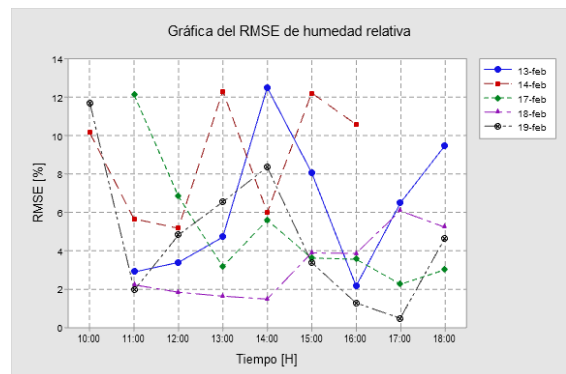
En el caso de la humedad relativa la curva de dispersión simulada sigue la tendencia de la curva medida para cada día de análisis, sin embargo, se observa que en ciertos intervalos de tiempo los valores medidos están fuera del rango de error (supera el límite superior o inferior). La figura de caja y bigotes permite conocer que los datos simulados y medidos tienen mediana similar en cada día, aunque los datos simulados tienen mayor dispersión (Anexo 5).

Respecto al CO<sub>2</sub> de la figura 3.14. se observa que los datos simulados siguen la tendencia de la curva de datos medidos experimentalmente y se encuentran en el rango de error de medición del equipo. Sin embargo, en algunas horas específicas de la tarde la curva de datos simulados sale del límite superior de error, entonces los datos simulados están sobredimensionados, de la misma forma el diagrama de caja y bigotes (Anexo 5) muestra variabilidad de las muestras simuladas y medidas. Dicha variabilidad se debe a que los parámetros de simulación de contaminantes que el software considera son: concentración uniforme del contaminante en cada lugar, se desprecia la resistencia del aire en cada cuarto y el transporte de contaminantes es instantáneo dentro del sitio.

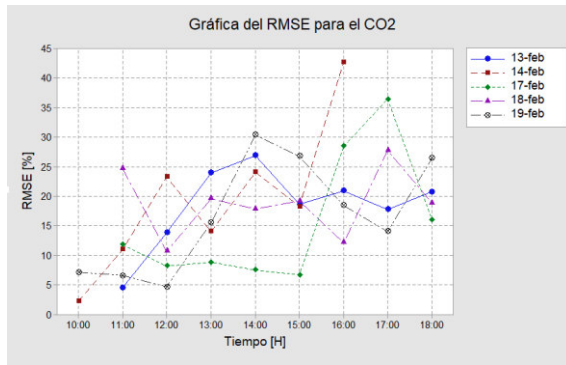
Para validar los resultados simulados con los medidos se analiza los indicadores estadísticos RMSE, MAE y MBE de cada día para las tres variables (temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub>).



(a)

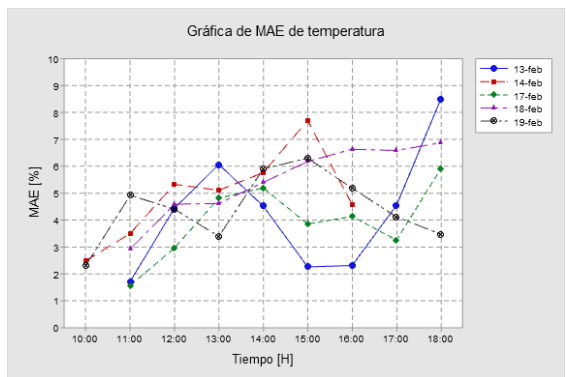


(b)

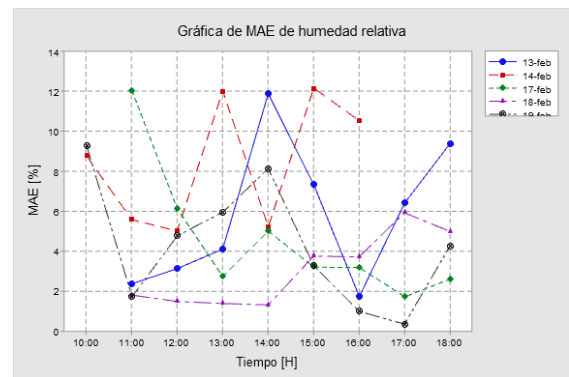


(c)

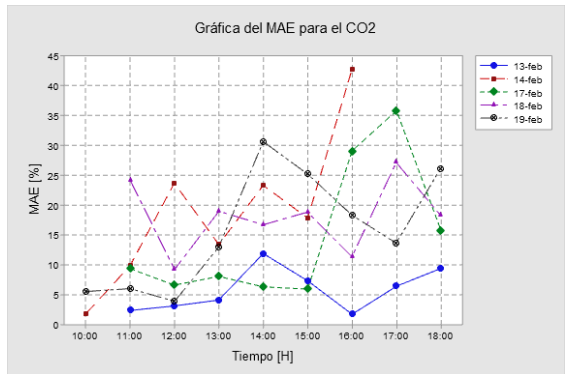
Figura 3. 13. Índice estadístico RMSE [%] de temperatura interior seca (a), humedad relativa (b) y CO<sub>2</sub> (c) en cada día de medición. (Fuente: Autores)



(a)

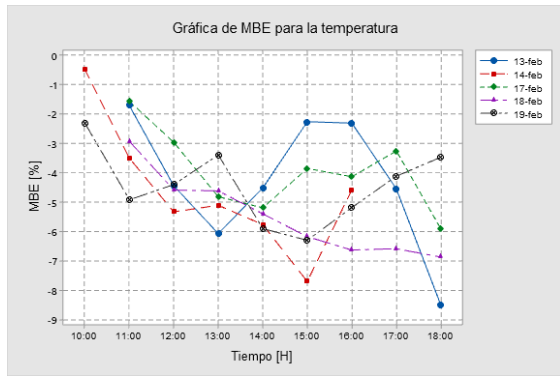


(b)

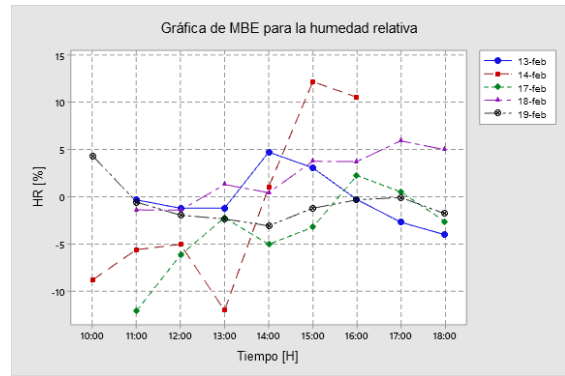


(c)

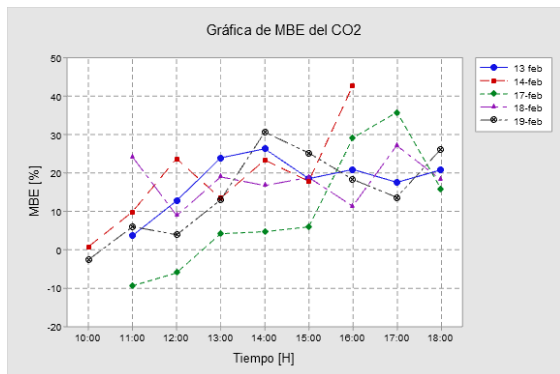
Figura 3. 14. Índice estadístico MAE [%] de temperatura interior seca (a), humedad relativa (b) y CO<sub>2</sub> (c) en cada día de medición. (Fuente: Autores)



(a)



(b)



(c)

Figura 3. 15. Índice estadístico MBE [%] de temperatura interior seca (a), humedad relativa (b) y CO<sub>2</sub> (c) en cada día de medición.  
(Fuente: Autores)

En la gráfica 3.13. se observa la variación de RMSE de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> para cada hora del día, durante los 5 días de medición. Del cual, la temperatura y humedad relativa presenta un RMSE mayor o igual al 12% en todos los días medidos. En el caso del CO<sub>2</sub> se sabe que las curvas de RMSE de los días 13 y 18 son menores al 30% por tanto se encuentran en el rango de error aceptable para validar un modelo [29]. En los días 14, 17 y 19 se tienen 1 período horario (1 hora del día) para cada día que supera el 30%, por tanto, en estos periodos se tiene un error significativo.

En el día 14 de febrero de 4 p.m. a 5 p.m. la curva simulada pierde la tendencia respecto a la curva de datos medidos; la curva simulada sube y la curva medida baja drásticamente, esto se debe a que el CO<sub>2</sub> se acumula y es sensible al aumento de ventilación y velocidad del aire; pero en la simulación la disminución es continua y progresiva de acuerdo a las aberturas existentes en el lugar. En la realidad las variaciones de flujo de aire son repentinas a mayor o menor velocidad, mientras que al software de simulación considera estanqueidad del aire y concentración uniforme del contaminante como se menciona anteriormente.

Concerniente a MAE, de la figura 3.14. se sabe que para temperatura y humedad relativa la variación de este índice estadístico no supera el 30% de error; mientras que para CO<sub>2</sub> existe 1 hora por día (14,17,19) que sale del rango permitido, tal como sucede con el RMSE. De esto se dice que RMSE y MAE son coincidentes, es decir que donde RMSE sale del rango aceptado, MAE también lo hace.

Como se ha dicho anteriormente, mediante MBE se corrobora que los datos de temperatura simulada están subestimados porque presentan valores MBE negativos, los valores de CO<sub>2</sub> simulados están sobredimensionados con presencia de valores MBE positivos y para humedad relativa se muestra sobreestimación de los valores simulados durante varios intervalos de tiempo y subestimación de los datos en otros.

Para que un modelo se valide, en confort térmico el índice RMSE debe estar en el rango [0% - 30%] y MBE en el rango del [0% - 10%] [38] y para validar IAQ el RMSE y MAE debe estar entre [0% - 30%] [29] [30]. En las tablas siguiente se conoce estos valores por día y promediado de los cinco días.

Tabla 3. 2. Índice estadístico RMSE de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> de los días simulados.

	Día 13-feb-2020	Día 14-feb-2020	Día 17-feb-2020	Día 18-feb-2020	Día 19-feb-2020	Promedio
	RMSE [%]	RMSE [%]	RMSE [%]	RMSE [%]	RMSE [%]	RMSE [%]
T	4,42	5,06	4,03	5,53	4,47	4,70
HR	6,21	8,86	5,02	3,27	4,79	5,63
CO <sub>2</sub>	18,39	19,36	15,47	18,79	16,64	17,73

(Fuente: Autores)

Tabla 3. 3. Índice estadístico MAE de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> de los días simulados.

	Día 13-feb-2020	Día 14-feb-2020	Día 17-feb-2020	Día 18-feb-2020	Día 19-feb-2020	Promedio
	MAE [%]	MAE [%]	MAE [%]	MAE [%]	MAE [%]	MAE [%]
T	4,29	4,92	3,96	5,47	4,44	4,61
HR	5,81	8,49	4,60	3,05	4,31	5,25
CO <sub>2</sub>	18,09	18,93	14,61	18,05	15,79	17,09

(Fuente: Autores)

Tabla 3. 4. Índice estadístico MBE de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> de los días simulados.

	Día 13-feb-2020	Día 14-feb-2020	Día 17-feb-2020	Día 18-feb-2020	Día 19-feb-2020	Promedio
	MBE [%]	MBE [%]	MBE [%]	MBE [%]	MBE [%]	MBE [%]
T	-4,29	-4,63	-3,96	-5,47	-4,44	-4,56
HR	-0,24	-1,10	-3,57	2,17	-0,78	-0,70
CO <sub>2</sub>	18,00	18,78	10,00	18,00	14,89	15,93

(Fuente: Autores)

De las tablas anteriores (Tabla 3.2, 3.3, 3.4.) se conoce que para confort térmico (T, HR) y CO<sub>2</sub> el RMSE en todos los casos son menores al 30%; en T y HR son menores al 10% y para el CO<sub>2</sub> de 17,09%. Por tanto, se encuentran en el rango recomendado.

MAE y MBE en temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> resultan errores menores al 30%. Se asegura que para temperatura los valores simulados están subestimados (MBE-), para humedad relativa también están subestimados (MBE-) y para CO<sub>2</sub> los valores medidos están sobrestimados (MBE+).

De acuerdo a *ASHRAE Guideline 2002* [38] se valida el modelo para confort térmico (T y HR). De igual forma de acuerdo a Veeresamy [29] y Willmott [30] se valida el modelo para el CO<sub>2</sub> con los errores promedios de las tablas 3.2., 3.3. y 3.4.

### 3.3. IEQ de las aulas de la FIM

El edificio de la FIM tiene 4 aulas (2 en el primer piso y 2 en el segundo piso) y 2 laboratorios (1 en el primero piso y 1 en el segundo piso), de estos se conoce la temperatura del aire interior y temperatura operativa del lugar. A continuación, se muestran las gráficas de temperatura del aire interior en cada lugar. Estas permiten hacer un análisis previo para conocer las aulas con mayor problema ya sea porque presentan temperatura y humedad muy alta o muy baja de acuerdo a los límites recomendados establecidos por la normativa NEC 11.

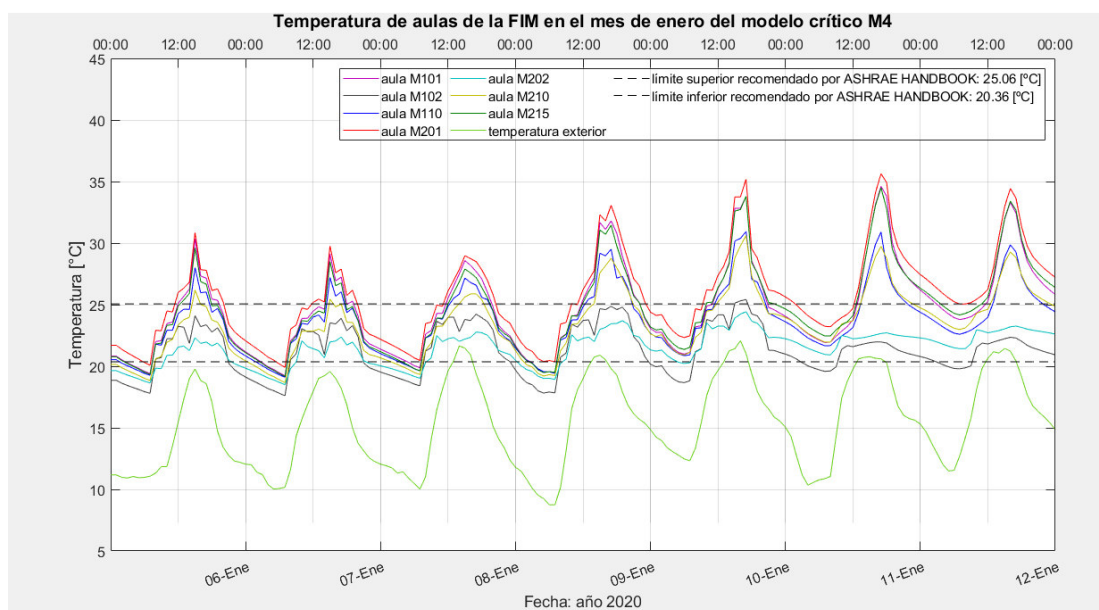
Dado que la simulación se realiza en dos condiciones de ocupación (alta y baja), es conveniente que se muestren las gráficas comparativas en la condición más crítica correspondiente a alta ocupación y baja ventilación para las 6 aulas de la FIM. Se simula la concentración de CO<sub>2</sub> para 6 escenarios de ventilación los cuales son: M1 (ventanas abiertas y puerta abierta, M2 (ventanas abiertas y puerta cerrada), M3 (2 ventanas abiertas y puerta abierta), M4 (ventanas cerradas y puerta cerrada), M5 (ventanas cerradas y puerta abierta) y M6 (2 ventanas abiertas y puerta cerrada).

En la figura 3.16. se muestra el comportamiento de la temperatura interior de cada aula para los 4 meses de análisis en el modelo M4 en condición de alta ocupación. En este mismo contexto se muestra la figura 3.17. con el comportamiento de la humedad relativa y en la figura 3.18. con el comportamiento del CO<sub>2</sub>. Además, en cada gráfica se incluye el comportamiento de cada variable exterior: temperatura interior seca y humedad relativa contenidas en el ambiente (datos meteorológicos). Este es un análisis previo útil para identificar las aulas críticas en condiciones de IAQ y confort térmico para posteriormente (apartado 3.4 y 3.5) realizar un análisis detallado del porcentaje de horas de confort térmico y porcentaje de horas donde la concentración de CO<sub>2</sub> se encuentra en el rango recomendado por las normativas *ASHRAE* (892 ppm) y NTP 549 (1000 ppm).

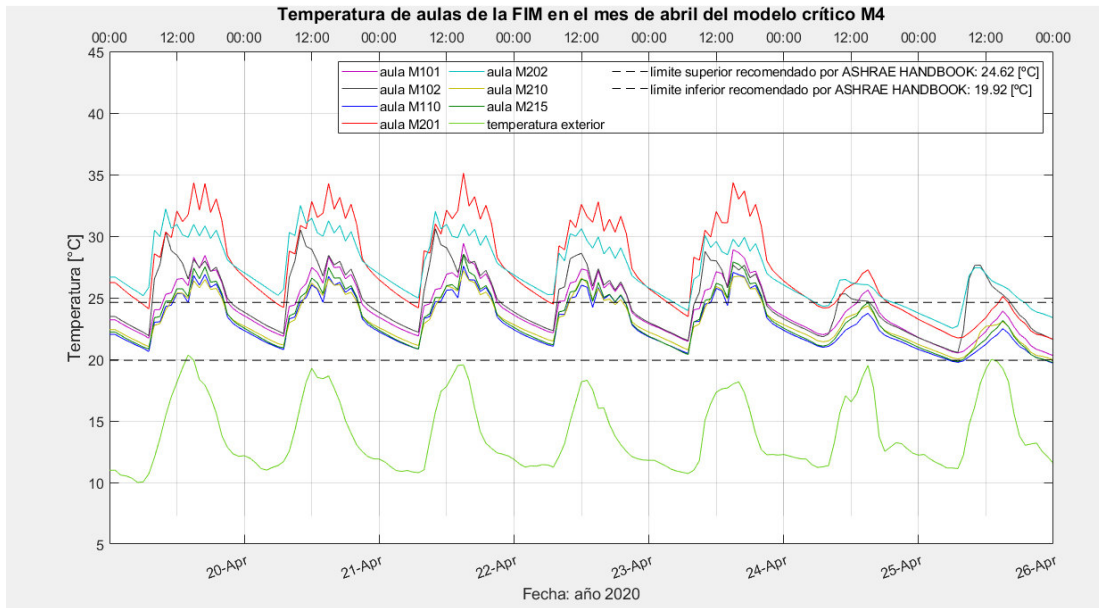
### 3.3.1. Resultados de las simulaciones de TBS, HR y CO<sub>2</sub> en el interior de las aulas de la FIM en los meses de enero, abril, julio y octubre.

Las figuras 3.16, 3.17 y 3.18 muestran los resultados de las simulaciones del modelo crítico M4 (alta ocupación y baja ventilación) en los meses de enero, abril, julio y octubre; se seleccionaron los meses en los cuales los estudiantes están en clases y donde se tienen diferentes perfiles climáticos en la ciudad de Quito.

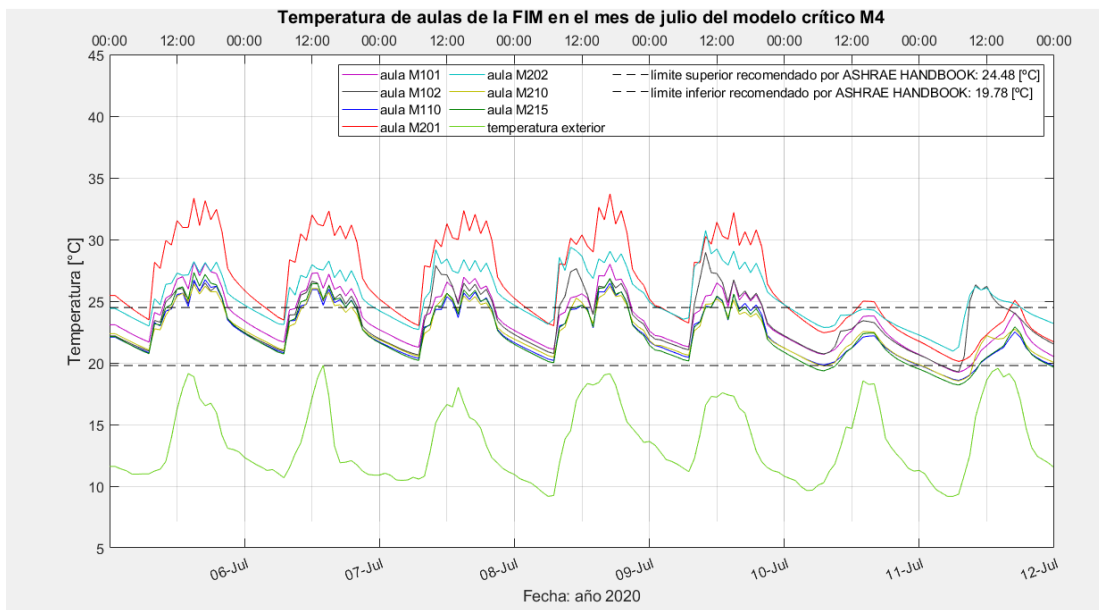
#### Temperatura en las aulas de la FIM en los meses de enero, abril, julio y octubre



(a)

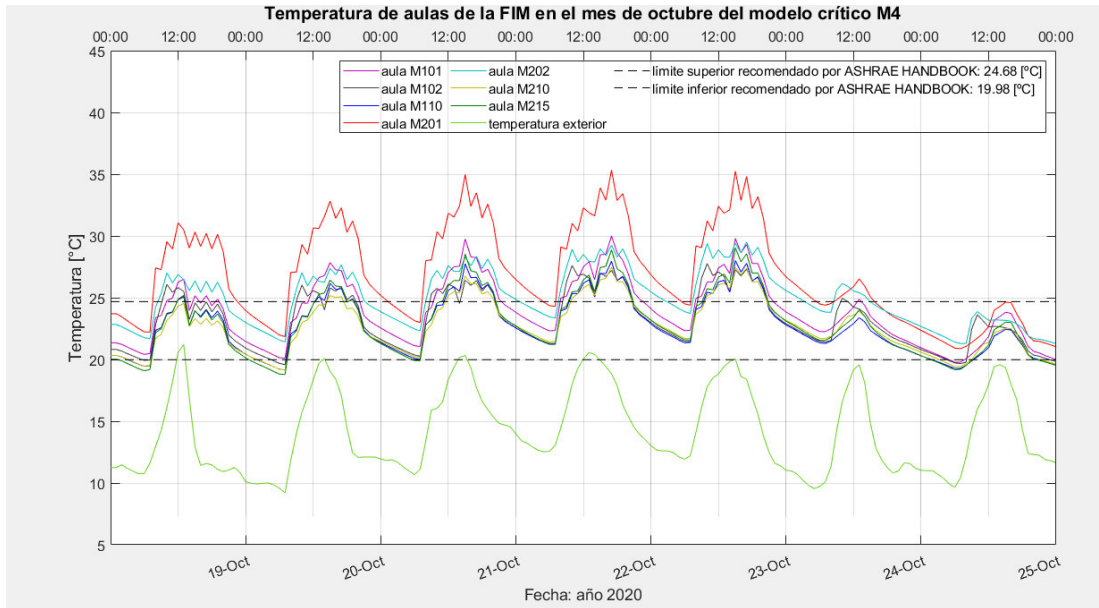


(b)



(c)

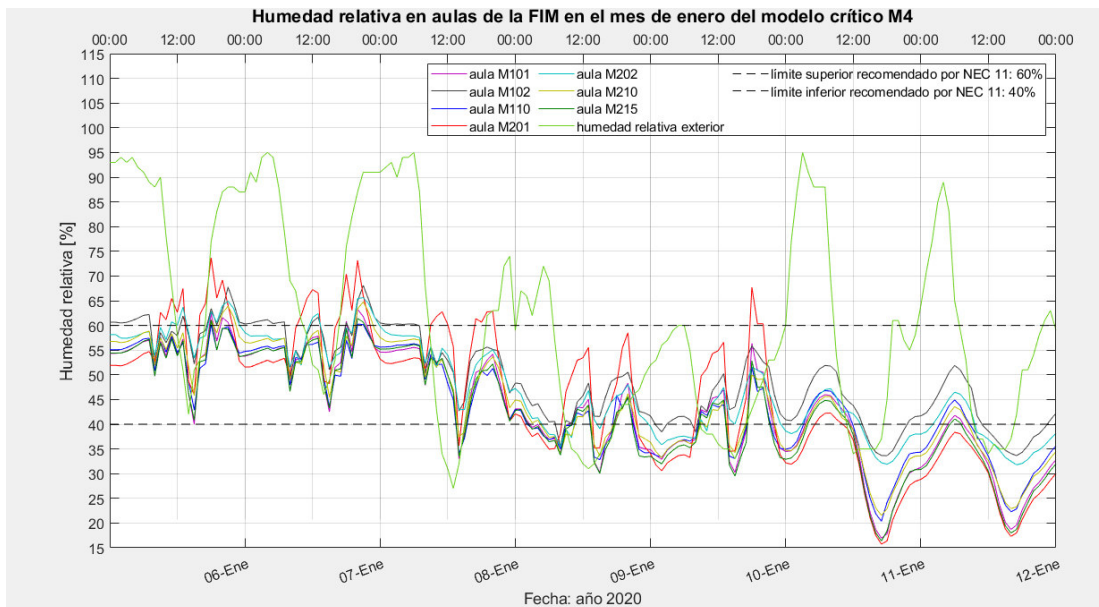




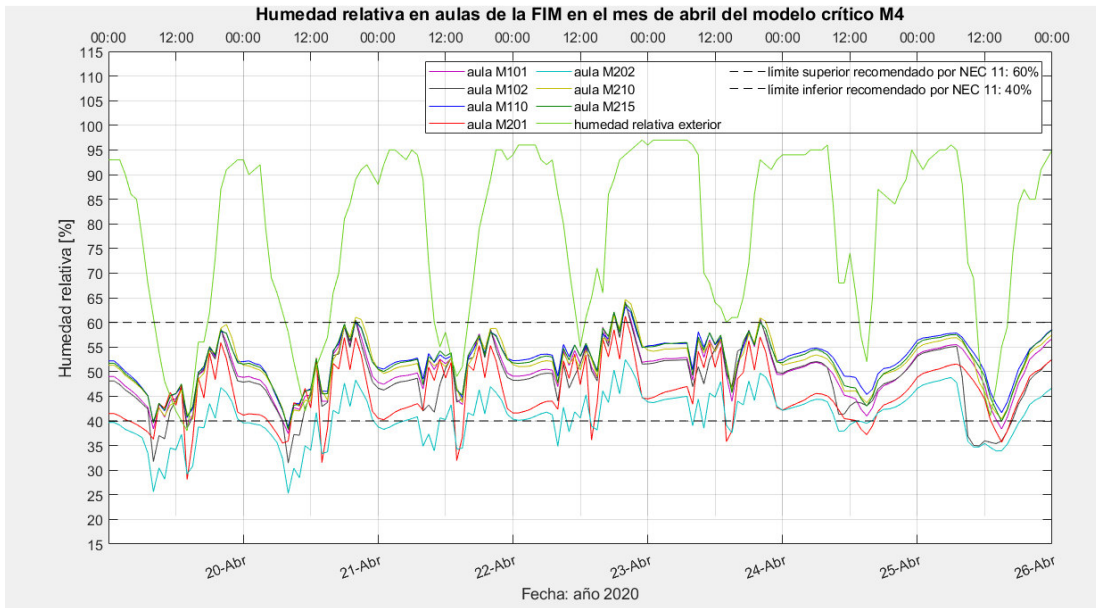
(d)

Figura 3. 16. Tint.seca [°C] en las aulas M101, M102, M110, M201, M202, M210 y M215 de la FIM en los meses de enero (a), abril (b), julio (c) y octubre (d) en el modelo de alta ocupación y baja ventilación (M4).  
(Fuente: Autores)

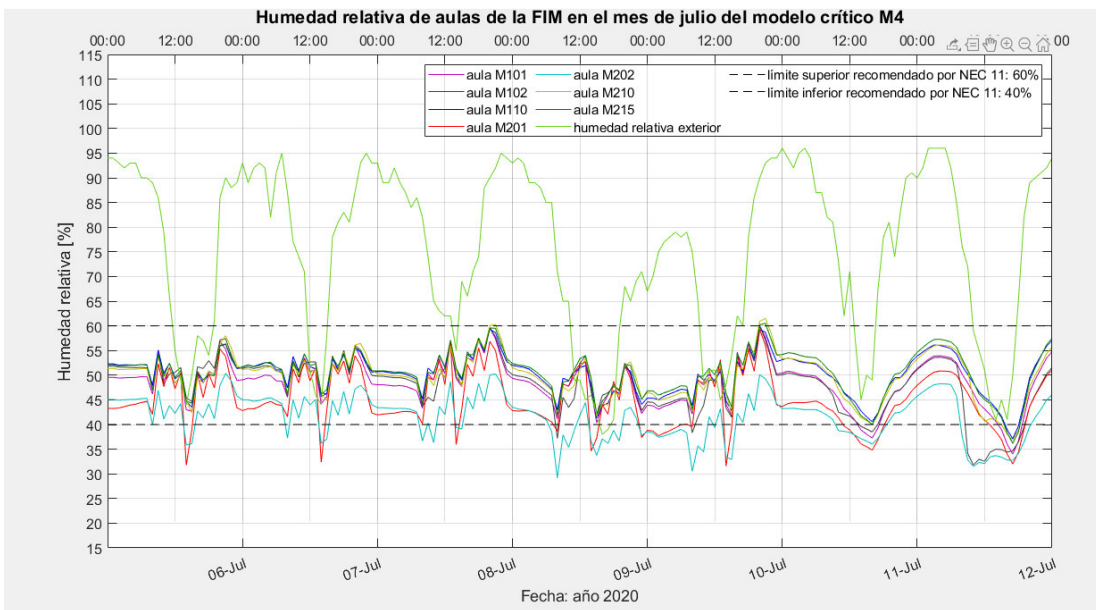
**Humedad relativa en las aulas de la FIM en los meses de enero, abril, julio y octubre**



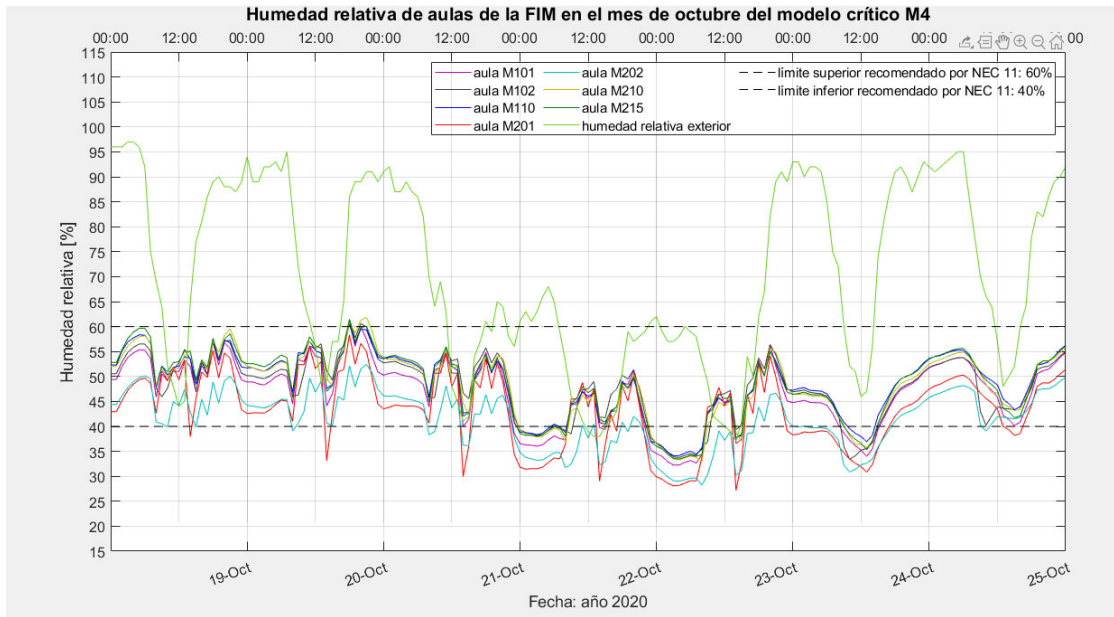
(a)



(b)



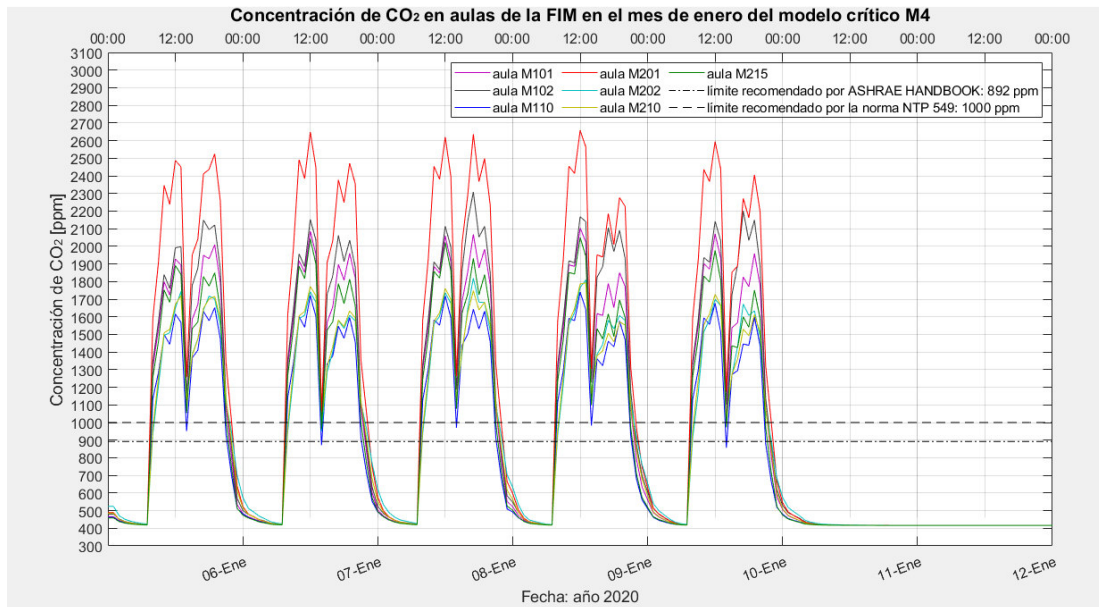
(c)



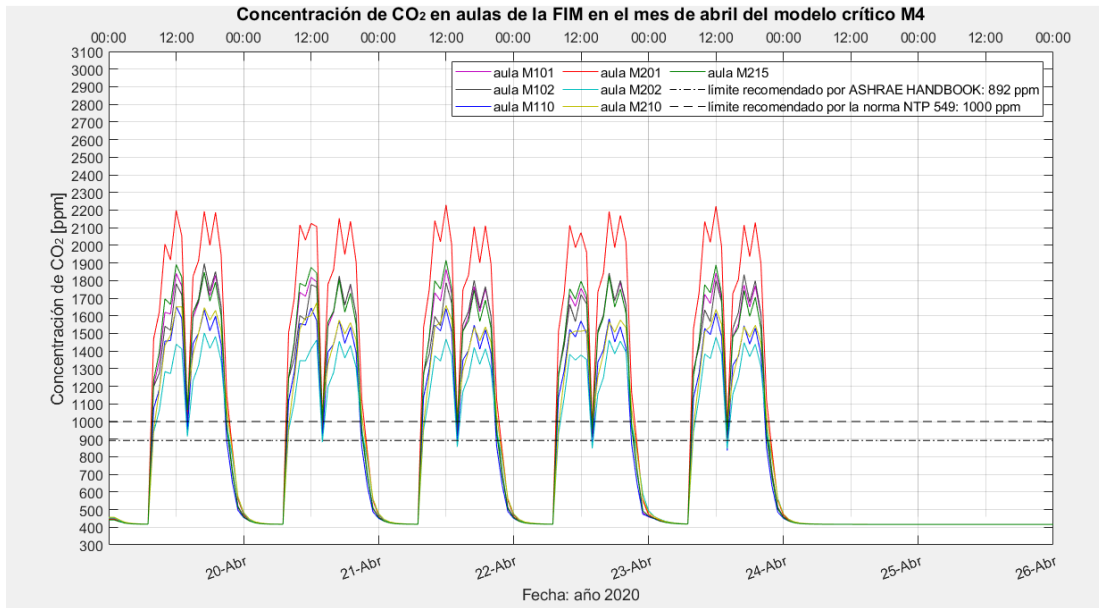
(d)

Figura 3. 17. HR [%] en las aulas M101, M102, M110, M201, M202, M210 y M215 de la FIM en los meses de enero (a), abril (b), julio (c) y octubre (d) en el modelo de alta ocupación y baja ventilación (M4).  
(Fuente: Autores)

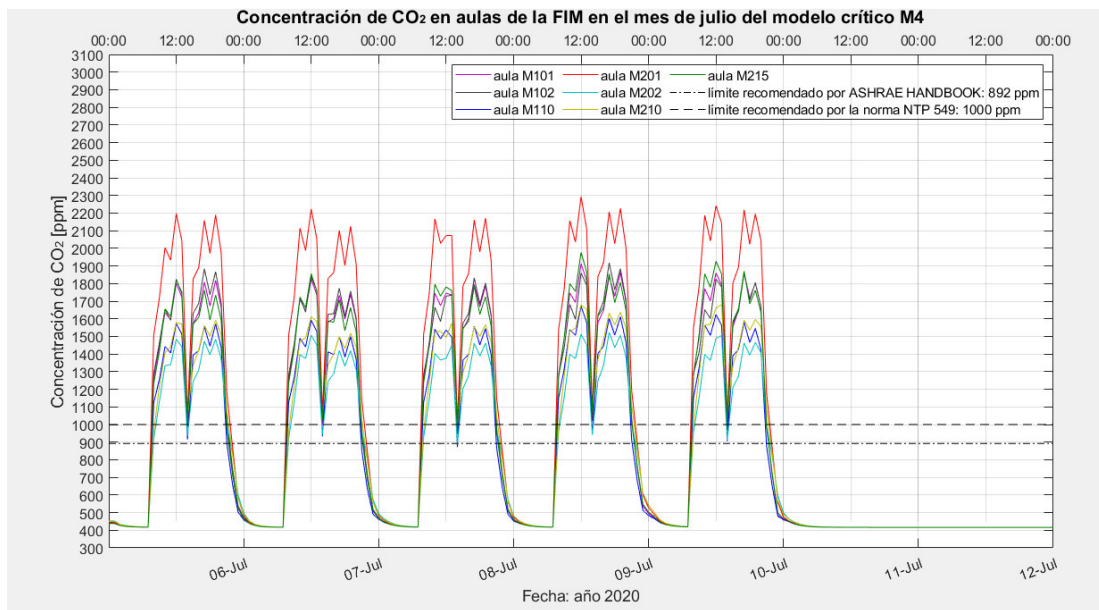
**Concentración de CO<sub>2</sub> en las aulas de la FIM en los meses de enero, abril, julio y octubre**



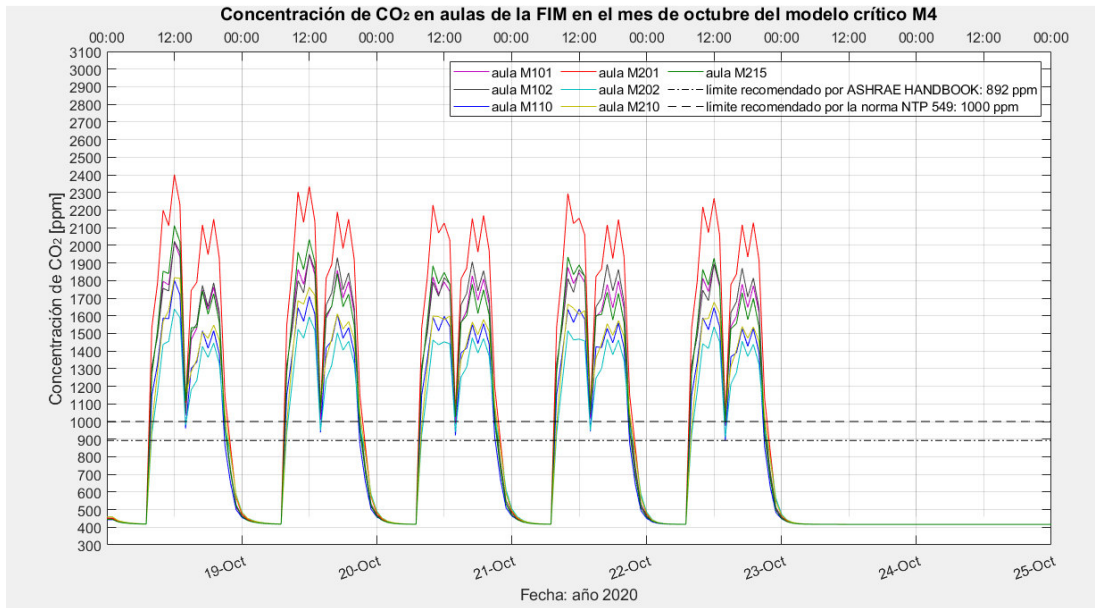
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3. 18. CO<sub>2</sub> [ppm] en las aulas M101, M102, M110, M201, M202, M210 y M215 de la FIM en los meses de enero (a), abril (b), julio (c) y octubre (d) en el modelo de alta ocupación y baja ventilación (M4).  
(Fuente: Autores)

Para el análisis del confort térmico, de la figura 3.16. se conoce que las aulas M201 (laboratorio), M101, M110 (laboratorio) y M215 (aulas del lado suroeste) en condición de alta ocupación son críticas porque presentan valores de temperatura interior seca mayores a los límites recomendados por *ASHRAE Handbook*; de igual manera la figura 3.17. muestra los picos en Humedad relativa interior fuera de los límites recomendados por NEC 11.

La figura 3.18. corresponde a la concentración de CO<sub>2</sub> en condición de alta ocupación en el interior de las aulas de la FIM; el comportamiento del CO<sub>2</sub> en el tiempo permite observar la ventilación del sitio. El aula menos ventilada es la M201 seguida de M101, M102 y M215. Sin embargo, cabe mencionar que en condición de alta ocupación y baja ventilación (M4) todas las aulas contienen concentraciones de CO<sub>2</sub> superiores a los 892 ppm (*ASHRAE Handbook*) y 1000 ppm (NTP 549).

Estas gráficas de IAQ en unión a las gráficas de confort térmico permiten identificar las aulas más críticas (IAQ y confort térmico) para posteriormente realizar un análisis detallado de las mismas. Se observa que en las aulas M215, M101 y M102 el comportamiento del CO<sub>2</sub> en el lugar es similar. Entonces se selecciona el aula M101 por ser el aula más ocupada y a la vez crítica tanto en confort térmico como en IAQ. También se analiza el aula M201 por ser la que posee mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> durante los meses en estudio

(enero, abril, julio y octubre) llegando hasta picos máximo de 2600 ppm en el mes de enero (figura. 3.18.a) y de 2200 ppm en los meses abril, julio y octubre (figura. 3.18.b,c,d).

Es primordial considerar el horario de ocupación de las aulas en la realidad por tanto se debe tomar en cuenta las aulas que permanecen ocupadas la mayor parte del día en el horario habitual de clase. De acuerdo a esto, se hace un estudio de confort térmico del aula M110 (laboratorio).

### 3.4. Confort Térmico

#### 3.4.1. Confort térmico en las aulas M201, M101 y M110 de la FIM

El confort térmico de un lugar se analiza al considerar el confort adaptativo de *ASHRAE Handbook* y valores recomendados por la normativa NEC11 como se explica en el apartado 1.2.1. de este escrito.

#### Zona de confort según *ASHRAE 55*

La temperatura operativa de confort recomendada ( $t_{oc}$ ) varía en dependencia de la temperatura exterior media mensual ( $t_{out}$ ), por tanto, los valores de temperatura operativa se analizan mensualmente. En la tabla 3.5. se muestran los resultados de temperatura operativa de confort recomendada para los meses de enero, abril, julio y octubre y se encuentran de acuerdo a las ecuaciones (1.2.), (1.3.) y (1.4.). Los valores promedio pueden ser usados en caso de que se requiera una única zona de confort.

Tabla 3. 5. Temperatura operativa de confort recomendada.

	$t_{out}$	$t_{oc}$	Límite superior de $t_{oc}$	límite inferior $t_{oc}$
Enero	15,34	22,56	25,06	20,36
Abril	13,93	22,12	24,62	19,92
Julio	13,49	21,98	24,48	19,78
Octubre	14,14	22,18	24,68	19,98
Promedio	14,23	22,21	24,71	20,01

(Fuente: Autores)

En el análisis de resultados de la FIM se considera una zona de confort en Quito para cada mes del año, de acuerdo a la tabla 3.5.

#### Zona de confort térmico según norma NEC 11

Otra manera de analizar el confort térmico de un lugar es mediante el control de la temperatura del aire interior seca del lugar. La norma ecuatoriana NEC 11 manifiesta que

la zona de confort en Quito debe estar en el rango de temperatura y humedad relativa que se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3. 6. Zona de confort térmico según normativa NEC 11.

	Límite superior	Límite inferior
Temperatura del aire interior [°C]	26	18
Humedad relativa [%]	60	40

(Fuente: [8])

En el análisis de los resultados de la FIM se usa las dos consideraciones, tanto los lineamientos dados por *ASHRAE 55* como los dados por la norma NEC 11. En los dos casos se muestran los resultados de manera gráfica.

### **3.4.2. Análisis de confort térmico en las aulas M201, M101 y M110 de la FIM**

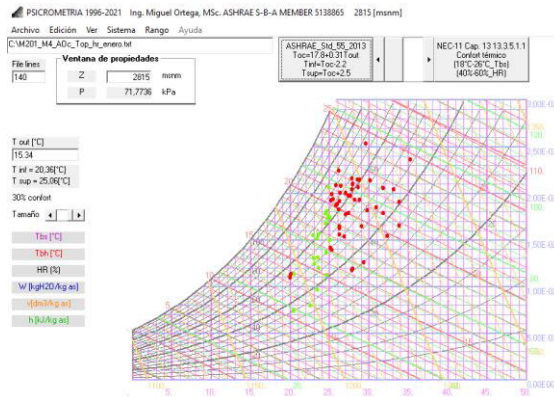
Se especifica el porcentaje de horas de confort térmico; para esto se muestran los resultados en la carta psicrométrica de la ciudad de Quito. Se analiza confort térmico recomendado por *ASHRAE* y NEC11. El análisis detallado se hace de acuerdo con el análisis previo del apartado 3.3. (IEQ) para el aula M201 (laboratorio) y para las aulas M101 y M110 (laboratorio) detallado en el Anexo 10.

De acuerdo con los resultados de la tabla 3.5. y con la ayuda del programa PSICROMETRÍA 1996-2021 elaborado por el Ing. Miguel Ortega profesor de la FIM de la EPN, se presenta las gráficas de confort térmico.

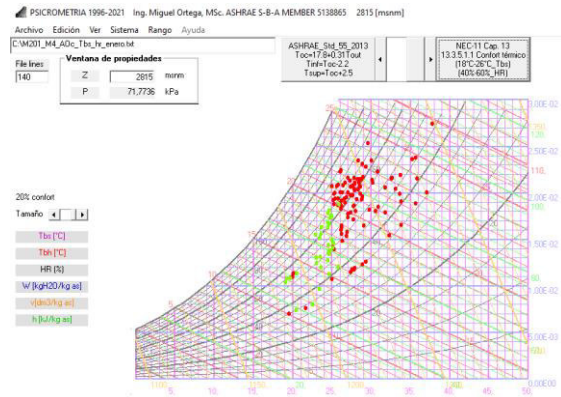
En cada gráfica se muestra la carta psicrométrica con 70 puntos dibujados (cada punto es horario durante 1 semana laborable) y se pintan en rojo los puntos que salen de la zona de confort térmico y en verde los que se encuentran en la zona de confort térmico. Los límites superior e inferior de  $t_{oc}$  que se muestran en la tabla 3.5. corresponden a la zona de confort térmico del modelo adaptativo según *ASHRAE 55* y los valores recomendados por NEC 11 de la tabla 3.6. para el modelo establecido por la normativa ecuatoriana.

En la figura 3.19. se muestra el porcentaje de confort térmico de todos los puntos dibujados para el aula M201 en alta ocupación y baja ventilación (M4); en las figuras IX.3. y IX.6. del Anexo 9 para el aula M101 y para el aula M110 respectivamente. En el Anexo 6 se recopila las gráficas de las cartas psicrométricas y confort térmico de las aulas M101, M110 y M201 simuladas en el escenario de ventilación baja (M4), ventilación media (M2) y ventilación máxima (M1) para ocupación alta y baja del lugar.

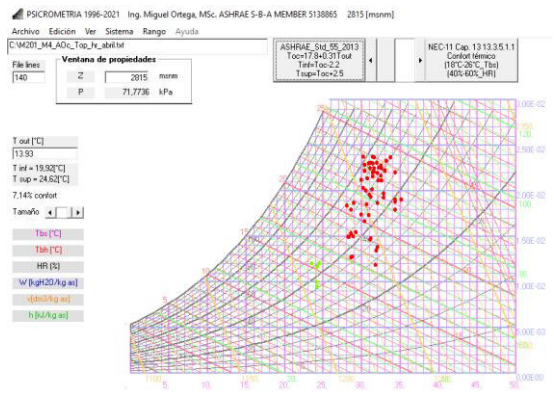
# Aula M201



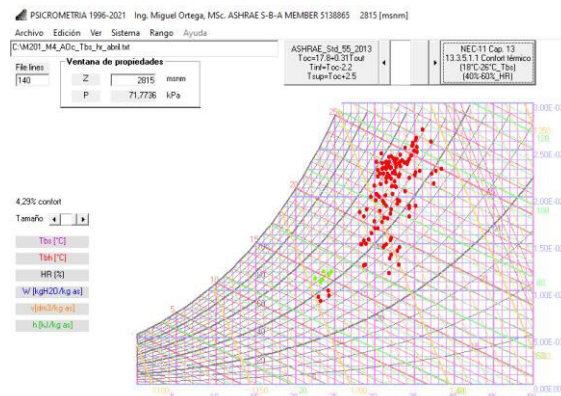
(a)



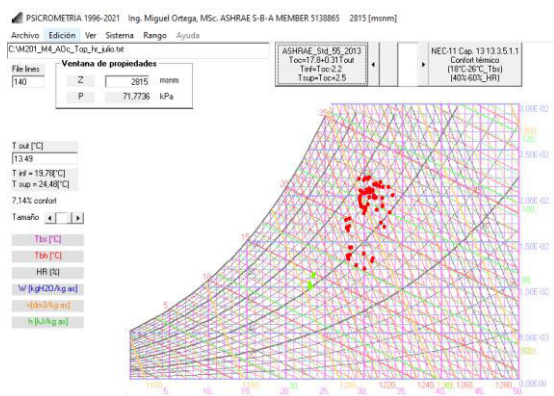
(b)



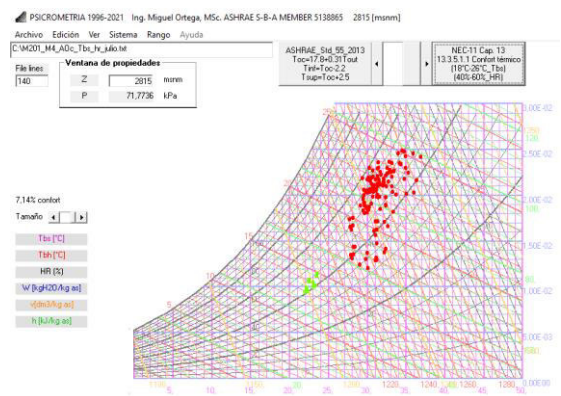
(c)



(d)

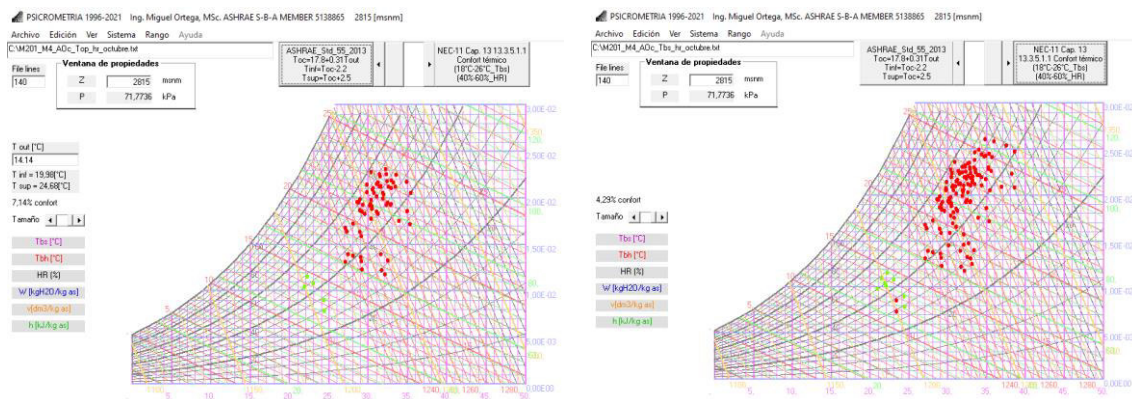


(e)



(f)





(g)

(h)

Figura 3. 19. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de *ASHRAE* (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M201 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).  
(Fuente: Autores)

Tabla 3. 7. Porcentaje de horas de confort térmico en el aula M201 en alta ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).

M201 Alta Ocupación	Ventilación Baja (M4)		Ventilación media (M2)		Ventilación máxima (M1)	
	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]
	ASHRAE 55 (t <sub>op</sub> )	NEC 11 (t <sub>air</sub> )	ASHRAE 55 (t <sub>op</sub> )	NEC 11 (t <sub>air</sub> )	ASHRAE 55 (t <sub>op</sub> )	NEC 11 (t <sub>air</sub> )
Enero	30	20	64,29	48,57	72,86	44,29
Abril	7,14	4,29	22,86	54,29	27,14	67,14
Julio	7,14	7,14	27,14	54,29	40	60
Octubre	7,14	4,29	32,86	34,29	44,29	42,86

(Fuente: Autores)

Tabla 3. 8. Porcentaje de horas de confort térmico en el aula M201 en baja ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).

M201 Baja Ocupación	Ventilación Baja (M4)		Ventilación media (M2)		Ventilación máxima (M1)	
	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]
	ASHRAE 55 (t <sub>op</sub> )	NEC 11 (t <sub>air</sub> )	ASHRAE 55 (t <sub>op</sub> )	NEC 11 (t <sub>air</sub> )	ASHRAE 55 (t <sub>op</sub> )	NEC 11 (t <sub>air</sub> )
Enero	55,71	50	67,14	42,86	62,86	40
Abril	7,14	4,29	38,57	58,57	68,57	65,71
Julio	7,14	7,14	65,71	41,43	85,71	47,14
Octubre	8,57	4,29	47,14	30	67,14	37,14

(Fuente: Autores)

En las tablas IX.1., IX.3. y las figuras IX.4., IX.7. del Anexo 9 se observa que el aula M110 presenta condiciones similares de confort térmico respecto al aula M101 lo que muestra

que en aulas de la FIM la condición de confort térmico es similar en todas las aulas con características semejantes.

De las gráficas 3.19, y las figuras IX.3, IX.6 contenidas Anexo 9 (confort térmico) se conoce que el modelo adaptativo varía significativamente respecto al modelo referencial de la normativa ecuatoriana (NEC 11).

Se considera que el método adaptativo de AHSRAE tiene mayor confiabilidad que la normativa ecuatoriana debido a que la norma NEC 11 únicamente emite valores generalizados de temperatura del aire interior y humedad relativa para todo el Ecuador; mientras que *ASHRAE* modifica la zona de confort dependiendo del lugar y temperatura exterior del medio. Debido a que la temperatura operativa de confort es directamente proporcional a la temperatura exterior del lugar se sabe que la zona de confort de *ASHRAE* incrementa cuando la temperatura exterior también incrementa.

Se analiza el mes de enero, abril, julio y octubre. De ellos, los meses de enero y octubre son más calientes que los meses de abril y julio (tabla 3.5.). De la tabla 3.7 los meses de abril, julio y octubre son los meses con mayor disconfort para el aula M201 con un 7,14% de horas de confort térmico durante las horas ocupadas. De las 70 horas ocupadas en una semana laborable (5 días) de 7 a.m. a 8 p.m. solamente 5 horas son confortables. Según la normativa ecuatoriana NEC 11 para la semana del mes de julio solamente 5 horas son confortables mientras que para los meses de abril y octubre el valor decrece a 3 horas. El mes más confortable es enero donde de las 70 horas a la semana 21 horas (30%) son confortables según *ASHRAE* y según NEC 11 solamente 14 horas (20%) son confortables. Cabe recalcar que los porcentajes de las horas de confort se han encontrado en condiciones de alta ocupación para el modelo de baja ventilación (M4) que es el más habitual.

De la tabla IX.1. (Anexo 9) el mes de abril es el mes con mayor disconfort de los cuatro meses analizados con un 14,29 % de confort térmico durante las horas ocupadas en el aula M101 de la FIM. Este valor muestra que de las 70 horas ocupadas en una semana laborable (5 días) de 7 a.m. a 8 p.m. analizadas en el mes de abril, únicamente 10 horas son confortables. Según la normativa ecuatoriana NEC 11 para la misma semana de abril únicamente 23 horas son confortables. En contraste, el mes más confortable es el mes de enero en el que de 70 horas a la semana 26 horas (37,14%) se encuentran en la zona de confort y según NEC 11 28 horas (40%) están en la zona de confort. Cabe recalcar que todos los porcentajes de confort y disconfort han sido encontrados en condiciones de alta ocupación, es decir cuando el aula M101 se encuentra en su máxima ocupación (M4).

En el edificio FIM el lado suroeste permanece expuesto al sol durante la tarde por tanto las paredes, ventanas y accesorios del edificio absorben calor y lo transmiten al interior del lugar. En el lado noreste del edificio el sol incide directamente en la mañana sin embargo por la existencia de otros edificios adyacentes, estos le hacen sombra. De esto conocemos que las aulas del lado suroeste del edificio son críticas y similares en condiciones de confort térmico durante todos los meses del año (M101, M201, M215), tal como se observa en la figura 3.20.

En las aulas M201 (tabla 3.7), M101 y M110 (tablas IX.1 y IX.3 del Anexo 9) también se conoce la variación de porcentaje de horas de confort térmico en condición de ocupación máxima. Se observa que cuando se permite ventilación únicamente por 2 ventanas deslizantes de giro vertical (ventilación media) durante todas las horas de clase, fácilmente aumentan las horas de confort térmico del sitio a un valor similar a cuando se permite la ventilación natural máxima por ventanas y puertas (M1). Es decir, cuando al menos 2 ventanas están abiertas se logra un confort térmico mayor al 90% en los meses de abril y julio y mayor al 67 % en enero y octubre para las aulas M101 y M110, según *ASHRAE 55* y *NEC 11*. En el caso de ventilación media del aula M201 el porcentaje de horas de confort es de 64,29% en el mes de enero y menor al 30% en los otros meses según *ASHRAE 55*; mientras que los valores son menores al 60% según *NEC 11*. En la tabla X.5. del Anexo 9 se observa que el aula M201 tiene mayor número de horas de confort térmico en régimen de ventilación máxima que en ventilación media, siendo la diferencia de 9,16% para *ASHRAE* y 8,21% para la norma *NEC 11*. En el aula M101 se observa que existe mayor número de horas de confort térmico en régimen de ventilación media que en ventilación máxima, siendo la diferencia de 3,21% para *ASHRAE* y 1,43% para la norma *NEC 11*. En el aula M110 se observa que existe mayor número de horas de confort térmico en régimen de ventilación máxima que en ventilación media, siendo la diferencia de 5% para *ASHRAE* y 2,5% para la norma *NEC 11*. Se observa que las 2 ventanas abatibles de eje horizontal no generan cambio significativo en el confort térmico del lugar tal como se muestra en el Anexo 6.

En las aulas M101 y M110 (tabla IX.2 y tabla IX.4 del Anexo 9) en condición de baja ocupación se observa tendencia similar en los resultados aunque se varíe la ventilación como se muestra en el diagrama de barras de las figuras IX.5 y IX.8 (Anexo 9), donde abril y julio superan el 70% de horas de confort térmico mientras que enero y octubre superan el 38% de confort en todos los escenarios de ventilación. Esto quiere decir que cuando la ocupación del lugar es baja (25% del máximo número de ocupantes) el ambiente del lugar no se altera significativamente por las condiciones metabólicas de los ocupantes y/o la

actividad que estos estén realizando, es decir que en el interior del sitio en baja ocupación el confort térmico del lugar depende únicamente del ambiente exterior. En el aula M201 (tabla 3.8) se observa la criticidad en confort térmico debido a que en máxima ocupación y máxima ventilación (M1) el porcentaje de horas de confort térmico es menor al 60% para los meses de enero, abril y octubre; el mes de julio alcanza el 80% de horas de confort. El diagrama de barras de la figura IX.2 del Anexo 9 (M201) muestra que la ventilación natural es insuficiente para renovar la cantidad de aire necesario en este sitio.

En los meses de enero y octubre se tienen menos horas de confort térmico en las aulas de la FIM que en los meses de abril y julio. En el mes de enero en todos los escenarios de ventilación se observa menos horas de confort que en los otros meses debido a los altos niveles de radiación en la ciudad de Quito tanto en la mañana como en la tarde como indica el archivo meteorológico. En el mes de octubre el archivo meteorológico muestra que las mañanas fueron soleadas y las tardes nubladas, esto hace que se tenga mayor número de horas de confort respecto a enero (mes con altos niveles de radiación). También se identifica que en baja ocupación mientras se aumenta la ventilación natural del lugar disminuye el confort térmico del sitio por el descenso de temperatura en influencia del ambiente exterior.

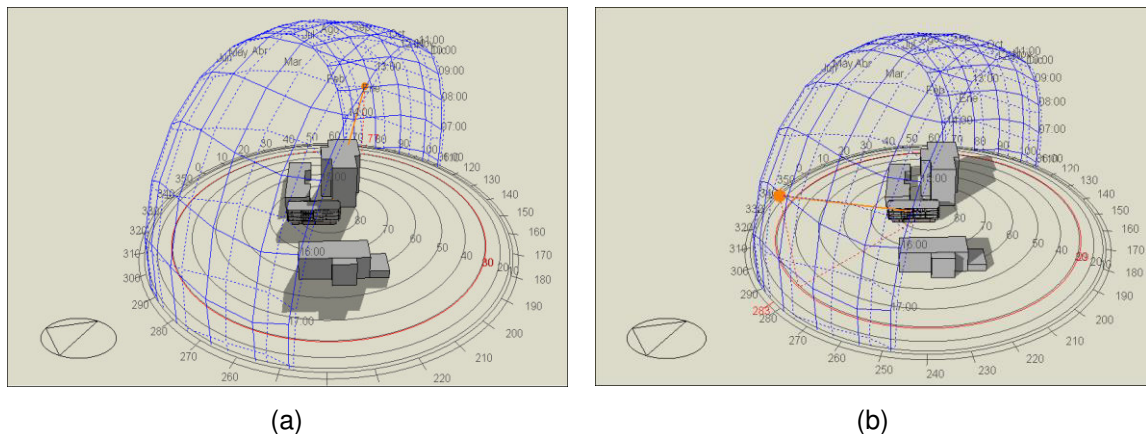


Figura 3. 20. Incidencia del sol en el edificio de la FIM en horas de la mañana (a) y en horas de la tarde (b) del mes de abril.  
(Fuente: Autores)

### 3.5. Indoor Air Quality (IAQ)

#### 3.5.1. IAQ en las aulas M201, M101 y M110 de la FIM

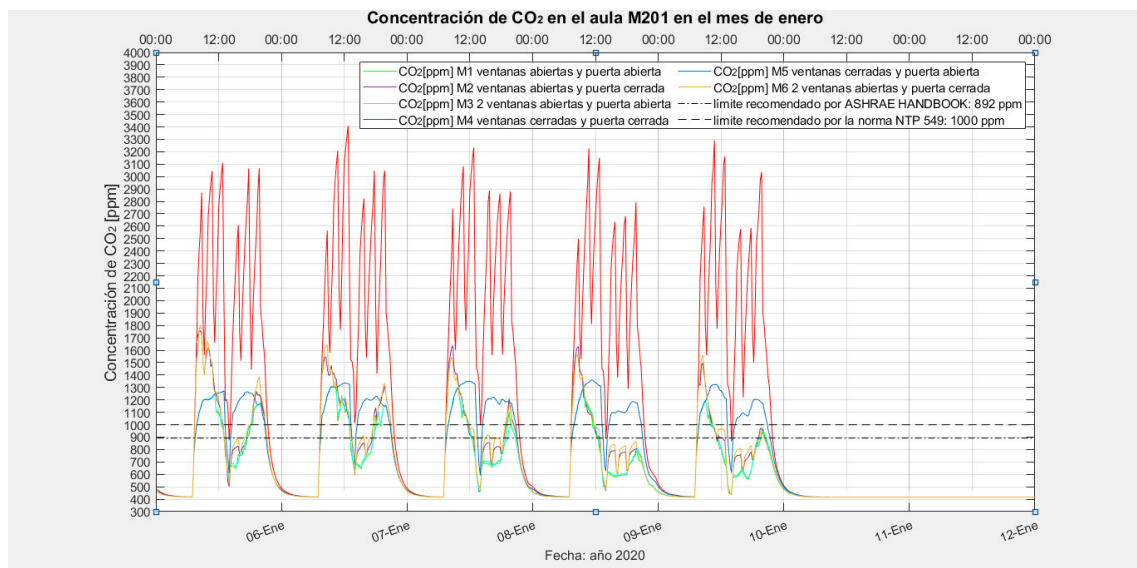
En esta sección se analiza la concentración del CO<sub>2</sub> en las aulas críticas de la FIM. Los casos de mayor criticidad son las aulas M201, M101 y M110. En las siguientes gráficas se muestra la variabilidad del CO<sub>2</sub> en alta y baja ocupación durante una semana por mes (enero, abril, julio y octubre).

El CO<sub>2</sub> que se genera en un medio interno es dependiente del número de personas que se encuentran en el sitio y de la concentración que ingresa de un medio adyacente y del ambiente exterior.

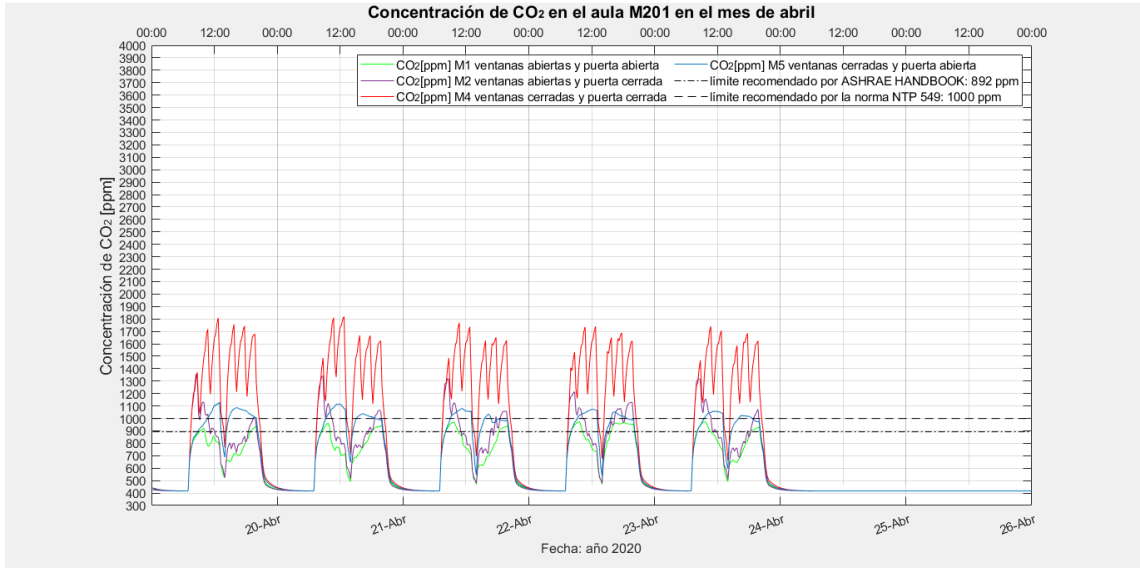
A continuación, se muestran los resultados de concentración de CO<sub>2</sub> en el aula M201, M101 y M110 en alta y baja ocupación (Anexo 7).

#### Aula M201

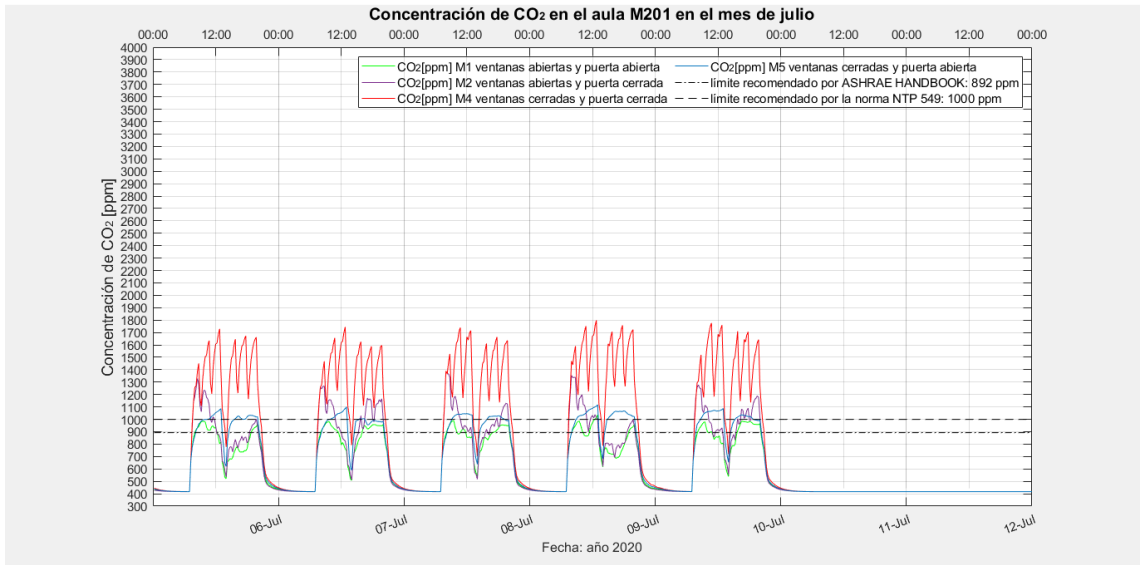
#### Alta ocupación



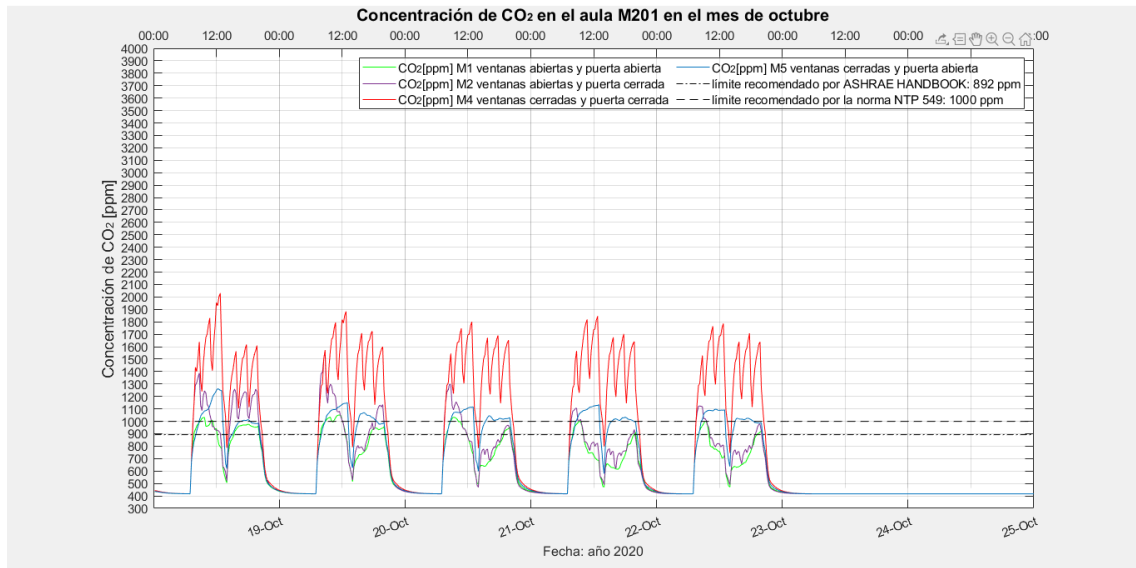
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3. 21. Concentración de CO<sub>2</sub> en los diferentes meses de enero (a), febrero (b), julio (c) y octubre (d) del año 2020 en el aula M201 para alta ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4, M5).

(Fuente: Autores)

Tabla 3.9. Porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> que se encuentran dentro del rango recomendado por *ASHRAE Handbook* y NTP 549 en el aula M201 en alta ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).

M201 Alta Ocupación	Ventilación Baja (M4)		Ventilación media (M2)		Ventilación máxima (M1)	
	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]
	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )
Enero	7,14	7,14	48,57	58,57	50,00	68,57
Abril	7,14	11,43	98,57	100	100	100
Julio	7,14	7,14	98,57	100	100	100
Octubre	7,14	7,14	94,29	100	100	100

(Fuente: Autores)

## Baja ocupación

Tabla 3.10. Porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> que se encuentran dentro del rango recomendado por *ASHRAE Handbook* y NTP 549 en el aula M101 en alta ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).

M201 Baja Ocupación	Ventilación Baja (M4)		Ventilación media (M2)		Ventilación máxima (M1)	
	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]
	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )
Enero	32,86	45,71	61,43	70	100	100
Abril	57,14	100	100	100	100	100
Julio	57,14	100	100	100	100	100
Octubre	52,86	98,57	100	100	100	100

(Fuente: Autores)

## Análisis de las gráficas de alta ocupación para las aulas M201, M101 y M110

En la figura 3.21 (a) del mes de enero para el aula M201 se observa que las tendencias del M3 y M6 son similares a las tendencias del M1 y M2 respectivamente. Se observa similitud en las tendencias debido a la cantidad de ventilación que hay en el lugar; en el M3 y el M1 se observa que no hay diferencia en la concentración de CO<sub>2</sub> al abrir 2 o 4 ventanas manteniendo la puerta abierta, por tanto, se debe abrir las 2 ventanas abatibles de giro vertical junto con la puerta para tener un régimen de ventilación similar al M1 de ventilación máxima. En el M6 y el M2 se observa que no hay diferencia en la concentración de CO<sub>2</sub> al modificar el régimen de ventilación por las ventanas siempre y cuando la puerta este cerrada. Adicionalmente en las figuras X.3. y X.6. (Anexo 10) para el mes de enero en las aulas M101 y M110 respectivamente, se observa la misma similitud en las tendencias del M3 y M6 con respecto al M1 y M2. Por este motivo se suprimen los modelos M3 y M6 en el análisis de la concentración de CO<sub>2</sub>.

En las figuras 3.21 y las figuras X.3. y X.6. (Anexo 10) de los modelos M2 y M4 en todos los meses se observan picos y valles sucesivos, estos picos corresponden a la acumulación de CO<sub>2</sub> durante 2 horas y los valles se dan lugar inmediatamente al abrir la puerta del aula; sin embargo, al cerrar la puerta después de permitir el ingreso a nuevos estudiantes sube progresivamente la concentración del CO<sub>2</sub> hasta que se evacúe las personas del lugar o se aumente la ventilación del lugar.

Se observa que las curvas de los modelos M1 y M5 en todos los meses simulados son continuas, de manera que los resultados dibujan curvas continuas con picos y valles



paulatinos. El valle se da a la 1 p.m. hasta las 2 p.m. que es el tiempo donde se abre la puerta y no hay estudiantes en el lugar.

Esto muestra que cuando se mantiene baja ventilación en el lugar, al abrir una puerta el efecto de la renovación de aire es drástico y disminuye la concentración de CO<sub>2</sub> rápidamente. Sin embargo, es importante considerar el tiempo de apertura de la puerta o ventanas debido a que de esto depende la renovación del aire en el lugar. En las figuras 3.21 y las figuras X.3. y X.6. (Anexo 10) se observa que cuando se abre la puerta un intervalo de 30 minutos por cada 2 horas de clases en alta ocupación, el CO<sub>2</sub> disminuye de forma gradual valores en rangos que varían entre los 600 ppm a 1400 ppm y cuando se mantiene la puerta abierta 1 hora (de 1 p.m. a 2 p.m.) el CO<sub>2</sub> se reduce drásticamente en rangos que varían entre los 1000 ppm y 2400 ppm del valor inicial.

En las figuras 3.21 y las figuras X.3. y X.6. (Anexo 10) para el M4 correspondiente al régimen de mínima ventilación (caso crítico) se puede observar que en la mayor parte del día los valores superan los 892 [ppm] de *ASHRAE* y los 1000 [ppm] de la norma NTP 549 al alcanzar valores de 3400 [ppm] en el aula M201, de 2500 [ppm] en el aula M101 y de 1900 [ppm] en el aula M110; para el aula M201 la concentración de CO<sub>2</sub> supera en 2500[ppm] y 2400[ppm] los valores permitidos según *ASHRAE* y NTP 549 respectivamente; para el aula M101 en 1600[ppm] y 1500[ppm] y para el aula M110 en 1000[ppm] y 900[ppm], por lo tanto los valores superan de forma considerable los límites recomendados por la normativa. El M4 es un caso de ventilación crítico que producirá en los estudiantes efectos de malestar, decaimiento, somnolencia, pérdida de atención que afectará al desempeño estudiantil [2].

En la tabla 3.9 del aula M201 para el modelo M4 se observa que para todos los meses el porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> aceptable de *ASHRAE* es 7,14%, esto quiere decir que de las 70 horas ocupadas en una semana laborable (5 días) de 7 a.m. a 8 p.m. solamente 5 horas cumplen con la normativa. El porcentaje de horas recomendado por la norma NTP 549 es menor al 15% es decir que de las 70 horas ocupadas en una semana laborable únicamente 10 horas cumplen con la normativa.

De igual forma al caso anterior, en la tabla X.1.(Anexo 10) del aula M101 para el modelo M4 se observa que para todos los meses el porcentaje de horas recomendado por *ASHRAE* es 7,14% (5 horas), el porcentaje de horas recomendado por la norma NTP 549 es de 11,43% (8 horas) para el mes de abril y 7,14% (5 horas) para los meses de enero, julio y octubre.

En la tabla X.3. (Anexo 10) del aula M110 para el modelo M4 se observa que para el mes de abril el porcentaje de horas recomendado por *ASHRAE* es de 12,86% (9 horas), mientras que para los meses de enero, julio y octubre es menor al 10% (7 horas). El porcentaje de horas recomendado por la norma NTP 549 es menor al 15% es decir que de las 70 horas ocupadas en una semana laborable únicamente 10 horas cumplen con la normativa.

En definitiva debido a que la normativa NTP 549 define 1000 ppm y la normativa *ASHRAE* define 892 ppm permitidos en ambientes interiores, en alta ocupación en todos los meses con los distintos escenarios de ventilación simulados las aulas M201, M101 y M110 no cumplen la norma NTP 549 y la norma *ASHRAE*.

En las figuras 3.21 y las figuras X.3. y X.6. (Anexo 10) se observa que los modelos M1, M3 y M5 tienen la similitud de que cada caso incluye ventilación por medio de la abertura de la puerta y en adición cualquier otra abertura. Mientras que en los modelos M2, M4 y M6 mantienen la puerta cerrada en adición a cualquier otra abertura. Este resultado muestra que cuando se abre la puerta, la renovación del aire del lugar es más rápida que cuando se lo hace por la abertura de ventanas. Esto sucede porque la puerta tiene mayor área de apertura. De acuerdo con las figuras 3.21 (a) y las figuras X.3 (a) y X.6 (a) Anexo 10, una vez analizados los modelos M1 y M5 se conoce que es suficiente abrir las 2 ventanas abatibles de giro vertical para tener un efecto similar al caso en el que se abren todas las ventanas, esto se debe a que 2 ventanas son de menor tamaño y de tipo deslizante de eje horizontal. Estas se utilizan para proteger al lugar del viento y limitar la entrada del aire directamente.

Se observa variación de los resultados en los meses simulados debido a la influencia de los datos meteorológicos; es decir que el ambiente exterior juega un papel importante en la calidad del aire de un lugar.

En todos los escenarios de ventilación para todos los meses simulados se tiene valores que superan los límites recomendados por las normativas, esto quiere decir que en un aula con estas características en ocupación máxima es necesario colocar más área de apertura ya sean más número de ventanas o puertas.

En las figuras 3.21 y las figuras X.3. y X.6. (Anexo 10) se observa que las curvas del mes de abril, julio y octubre tienen la misma tendencia que se explica en el mes de enero con la diferencia que en estos tres meses los niveles de concentración de CO<sub>2</sub> son menores respecto a enero. Este fenómeno sucede debido a la variación del clima o datos meteorológicos del ambiente exterior. En la figura 3.16 se observa que enero es el mes

con la temperatura de bulbo seco exterior más alta en comparación con los otros meses simulados, sin embargo, se observa que la diferencia de temperaturas entre las aulas y el exterior es menor por lo tanto en enero hay un menor intercambio de aire en comparación con los meses de abril, julio y octubre. Esto se puede verificar en la figura 3.18 donde se observa que la concentración de CO<sub>2</sub> de los modelos simulados en el mes de enero es mayor que la concentración de CO<sub>2</sub> de los modelos simulados en los otros meses. De igual forma para la condición de alta ocupación se observa la misma tendencia en las figuras 3.21.(a) y las figuras X.3.(a) y X.6.(a) (Anexo 10).

### **Análisis de las gráficas de baja ocupación para las aulas M201, M101 y M110**

Al igual que en las gráficas de alta ocupación, en el caso de baja ocupación el horario de programación del funcionamiento de las aulas M201, M101 y M110 se utiliza en condición de ocupación del 25% de máxima ocupación (9 personas), con variación de ventilación de acuerdo a los 6 modelos simulados y abertura de puertas cada 2 horas durante 30 min para entrada y salida de estudiantes al lugar.

Las tendencias de las curvas de baja ocupación respecto a alta ocupación son similares tal es el caso del modelo M2 y M4 que presentan picos y valles y los modelos M1 y M5 que presentan datos continuos (figuras VII.1, VII.2 y VII.3 Anexo 7).

En las figuras VII.1, VII.2 y VII.3 citadas en el Anexo 7, para todos los meses se observa que cuando se abre la puerta un intervalo de 30 minutos cada 2 horas, el CO<sub>2</sub> disminuye en un rango de valores que varían entre 100 ppm a 400 ppm y cuando se mantiene la puerta abierta 1 hora (de 1 p.m. a 2 p.m.) el CO<sub>2</sub> disminuye en un rango de valores que varían entre 300 ppm a 800 ppm de tal forma que los niveles de CO<sub>2</sub> son bajos (500 - 600 ppm) en esta hora del día. Esto significa que el tiempo que se requiere para renovar el aire hasta valores recomendados por la normativa es menor en baja ocupación (9 personas) que en alta (35 personas).

En la tabla 3.10 del aula M201 para el modelo M4 se observa que en el mes de enero el porcentaje de horas recomendado por *ASHRAE* es 32,86%, esto quiere decir que de las 70 horas ocupadas en una semana laborable (5 días) de 7 p.m. a 8 p.m., 23 horas cumplen con la normativa; en los meses de abril, julio y octubre el porcentaje de cumplimiento de horas de CO<sub>2</sub> es del 60% (42 horas). El porcentaje de horas recomendado por la norma NTP 549 es menor al 45,71% (32 horas) para el mes de enero y del 100% para los meses de abril, julio y octubre.

En la tabla X.2.(Anexo 10) del aula M101 para el modelo M4 se observa que para el mes de enero el porcentaje de horas recomendado por *ASHRAE* es 48,57% (40 horas) y para los meses de abril, julio y octubre el porcentaje de horas recomendado por *ASHRAE* supera el 90% (63 horas). El porcentaje de horas recomendado por la norma NTP 549 es mayor al 90% (63 horas) para el mes de enero y del 100% para los meses de abril, julio y octubre.

En la tabla X.4.(Anexo 10) del aula M110 para el modelo M4 se observa que el porcentaje de horas recomendado por *ASHRAE* y NTP 549 es 100% para los meses simulados. En el caso del aula M110 la concentración de CO<sub>2</sub> cumple con la normativa en condición de baja ocupación.

Debido a que la normativa NTP 549 define 1000 [ppm] permitidos en ambientes interiores; en baja ocupación en los meses de abril, julio y octubre con todos los modelos de ventilación simulados en las aulas M201, M101 y M110 tienen la mayoría de los valores dentro del rango permitido por la norma NTP 549 y ciertos picos que sobrepasan la normativa en periodos de tiempo de aproximadamente una hora al mediodía. Por lo tanto las aulas pasan la normativa con excepción del periodo de (12 p.m. a 1 p.m.).

En las figuras VII.1, VII.2 y VII.3 citadas en el Anexo 7, se observa que para el mes de enero los picos de las curvas de resultados simulados toman valores de 1500 [ppm] para el aula M201, 1200 [ppm] para el aula M101 y 950 [ppm] para el aula M110, en esto distan de los meses posteriores. Es decir, la concentración de CO<sub>2</sub> en el mes de enero es más elevada que en los meses abril, julio y octubre.

En las figuras VII.1, VII.2 y VII.3 citadas en el Anexo 7, se observa que cuando se tiene el 25% de ocupación del aforo máximo (9 personas) la concentración de CO<sub>2</sub> tiende a ser mayor en el mes de enero en contraste con los meses de abril, julio y octubre. Por otra parte, en todos los meses se observa gran similitud entre el M2 y M4, en el periodo desde las 7 a.m. hasta la 1 p.m. se puede apreciar que hay similitud en la concentración de CO<sub>2</sub> al abrir las 4 ventanas o al mantenerlas cerradas, siempre que se mantenga la puerta cerrada; esto se debe a la falta de ventilación en el lugar, es decir que en la condición de baja ocupación las 4 ventanas no son suficientes para ventilar adecuadamente el lugar, esto se debe a las condiciones meteorológicas ya que las temperaturas de las aulas y la temperatura del exterior son similares; y al diseño del edificio de la FIM ya que en la parte exterior se encuentran unos perfiles metálicos que no permiten que el viento entre directamente en las aulas.

Se ha simulado varios escenarios de ventilación para las aulas M201, M101 y M110, en las cuales se observa que en la condición de baja ocupación la concentración de CO<sub>2</sub> de los

modelos M2, M4 y M6 se encuentra fue del rango recomendado por la normativa NTP 549 y *ASHRAE* y los modelos M1, M3 y M5 se encuentran en los rangos recomendados por las normativas en cuestión.

### 3.5.2. CO<sub>2</sub> exhalado como riesgo de infección por COVID 19 para diferentes entornos y actividades interiores

En la actualidad la pandemia del síndrome respiratorio agudo severo coronavirus 2 (SARS-CoV-2) más conocido como COVID-19 que apareció en Wuhan (China) en diciembre del 2019 está devastando el mundo y causando grandes pérdidas de vidas humanas. En los últimos meses, se ha evidenciado la transmisión de COVID-19 a través de aerosoles que contienen partículas con diámetros menores a 100 µm. Los aerosoles pueden flotar en el aire durante minutos u horas y se han detectado en el aire exhalado de pacientes con COVID-19 y en el aire de los hospitales donde se trata a los pacientes infectados [35].

EL CO<sub>2</sub> exhalado por una persona infectada con COVID-19 contiene aerosoles con SARS-CoV-2 y puede ser utilizado como un indicador del nivel de concentración de SARS-CoV-2 en interiores. Se debe medir el nivel de CO<sub>2</sub> en interiores para monitorear el riesgo de transmisión de aerosoles que pueden contener COVID-19 y otras enfermedades respiratorias.

El riesgo de contagio relativo en un entorno determinado aumenta con los niveles excesivos de CO<sub>2</sub>, por lo tanto, mantener el CO<sub>2</sub> lo más bajo posible en un entorno determinado permite optimizar la protección proporcionada por la ventilación. En la figura 3.22. se puede observar el proceso de inhalación y exhalación de CO<sub>2</sub> en conjunto con aerosoles por parte de una persona infectada con SARS-CoV-2 dentro de un espacio cerrado. De esto se observa que el SARS-CoV-2 contenido en aerosoles puede contaminar fácilmente con el virus a una persona que se encuentre en el lugar.

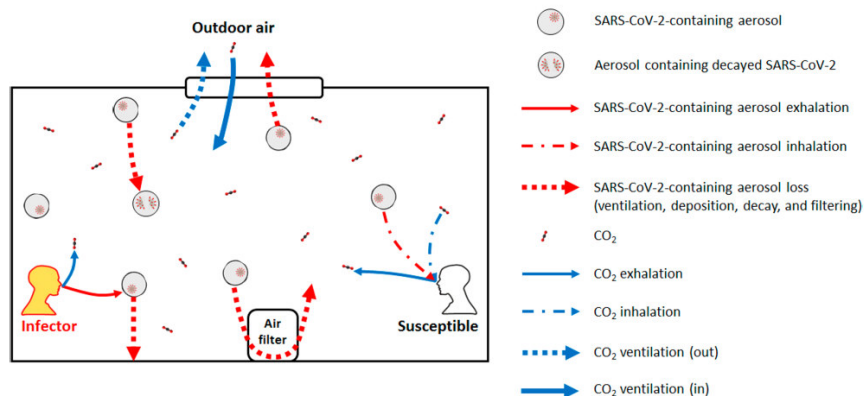


Figura 3.22. Proceso de inhalación y exhalación en ambientes con CO<sub>2</sub> y SARS-CoV-2. (Fuente: [35])

Según Peng [35] es recomendable monitorear el nivel de CO<sub>2</sub> en espacios interiores y mantener el nivel del CO<sub>2</sub> dentro de los límites recomendados por la normativa *ASHRAE* y NTP 549 para prevenir el contagio de COVID-19. En el caso de la ciudad de Quito el valor recomendado por la normativa *ASHRAE* es de 892 ppm y según NTP 549 es de 1000 ppm. Las experiencias de la ingeniería y otros campos de estudio indican que la cantidad de aire exterior que se debe suministrar al lugar debe ser alrededor de 10 l/s por persona para tener una buena calidad de aire interior en espacios de oficinas [7]. Menor cantidad de suministro de aire puede producir los síntomas del síndrome del edificio enfermo que a la vez es un foco de proliferación de virus y bacterias en el lugar entre ellos el SARS-CoV-2 (COVID-19).

## 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo se evalúa la calidad del ambiente interior de una muestra de aulas de la carrera de ingeniería mecánica de la Escuela Politécnica Nacional mediante un modelo validado en otra dependencia de la universidad con el uso del software *DesignBuilder*.

### 4.1. Conclusiones

Al evaluar el confort térmico bajo las normativas *ASHRAE* (confort adaptativo, temperatura operativa tabla 3.5.) y NEC 11 (temperatura de confort de 18°C a 26°C y en humedad relativa en rango de 40% a 60%) se concluye que las aulas del lado suroeste (M201, M101 laboratorio, M215) del edificio son críticas y similares durante todos los meses del año. Se toma al aula M201 como referencia por ser la más crítica en confort térmico y calidad del aire (CO<sub>2</sub>, ver figuras 3.16, 3.17, 3.18). El modelo M1 (ventilación máxima y alta ocupación) es el mejor escenario de ventilación para el aula M201; presenta mayor número de horas de confort térmico que el M2 y M4. En los meses de enero, abril, julio y octubre según *ASHRAE* los valores son de 72,86%, 27,14%, 40%, 44,29% y según NEC 11 de 44,29%, 67,14%, 60% y 42,86% respectivamente (tabla 3.7.). El modelo M2 (ventilación media y alta ocupación) muestra que en los meses de abril y julio según *ASHRAE* es del 22,86% y 27,14% respectivamente (tabla 3.7.) y según NEC 11 es del 54,29% en los dos meses (abril y julio, tabla 3.7.). En los meses de enero y octubre según *ASHRAE* el porcentaje de horas de confort térmico aumenta al 64,29% y 32,86% respectivamente y según NEC 11 aumenta al 72,86% en enero y 44,29% en octubre. El modelo M4 (ventilación baja y condición de alta ocupación) no es recomendable ya que el porcentaje de horas de confort térmico es menor al 30% en enero y menor al 8% en los meses de abril, julio y octubre (*ASHRAE* y NEC11). En las aulas M201 y M110 en alta ocupación el escenario con mayor porcentaje de horas de confort térmico recomendado por *ASHRAE* y NEC 11 es M1 (ventilación máxima) y en M101 es el M2 (ventilación media) (tabla 3.7., tabla IX.1., tabla IX.3.).

En el aula M201 en baja ocupación el escenario con mayor porcentaje de horas de confort térmico recomendado por *ASHRAE* y NEC 11 es M1 (ventilación media) (tabla 3.8.). En el aula M101 y M110 en condición de baja ocupación el porcentaje de horas de confort es superior al 48% para M101 y 90% para M110 en los meses analizados (enero, abril, julio y octubre), por tanto, se concluye que mientras menos personas estén presentes en las aulas se tienen más número de horas de confort térmico.

En el aula M201 en alta ocupación y baja ventilación (M4) en los meses de enero, abril, julio y octubre el porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> recomendado por *ASHRAE* y NTP 549 es 7,14% en CO<sub>2</sub>; por lo tanto es un aula crítica no recomendada para actividades educativas en estas condiciones. En alta ocupación y media ventilación (M2) en el mes de enero el porcentaje de horas recomendado por la normativa *ASHRAE* y NTP 549 es de 48,57% y, 57% respectivamente; en los meses de abril, julio y octubre el porcentaje de horas recomendado por las normativas es mayor al 90%. En la condición de alta ocupación y ventilación máxima (M1), en el mes de enero el porcentaje de horas recomendado por las normativas es mayor al 50% y en los meses de abril, julio y octubre el porcentaje de horas recomendado por las normativas es del 100%. Se concluye que el mejor escenario para el desarrollo de actividades educativas es el M1 (ventilación máxima).

En aula M201 en condición de baja ocupación y alta ventilación (M1) el porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> recomendado por las normativas *ASHRAE* y NTP 549 es del 100% (enero, abril, julio y octubre). En aula M201 en condición de baja ocupación y media ventilación (M2) el porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> recomendado por las normativas *ASHRAE* y NTP 549 es del 100% (abril, julio y octubre) a excepción de mes de enero que es del 61,43% (*ASHRAE*) y 70% (NTP 549). En aula M201 en condición de baja ocupación y baja ventilación (M4) el porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> recomendado por las normativas *ASHRAE* y NTP 549 es variable para cada mes; en enero (32,86% y 45,71%), en abril y julio (57,14% y 100%) y en el mes de octubre (52,86% y 98,57%) para *ASHRAE* y NTP 549 respectivamente. En el contexto de la pandemia del COVID-19 es recomendable mantener la ventilación máxima todo el tiempo (M1) para lograr el 100% de horas con CO<sub>2</sub> dentro de las recomendaciones dadas por las normativas.

Del análisis de la calidad del aire (CO<sub>2</sub>), se concluye que en alta ocupación con ventilación baja (M4), media (M2) y alta (M1), en las aulas M101 y M110 la concentración del CO<sub>2</sub> supera el valor límite recomendado por las normativas *ASHRAE* (892 ppm) y NTP 549 (1000 ppm). Este fenómeno es un problema porque cuando más caliente y seco es el clima mayor concentración de CO<sub>2</sub> se tiene en el ambiente interior. Se concluye que las aulas M201, M102 y M110 de la FIM con ocupación máxima son una potencial fuente de contagio del virus SARS-CoV-2 en cualquier escenario de ventilación.

En baja ocupación en el aula M110 el porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> recomendado por *ASHRAE* y NTP 549 en los modelos (M1, M2, M4) es cercano al 100%. En aula M101 en condición de baja ocupación y baja ventilación (M4) el porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> recomendado por las normativas *ASHRAE* y NTP 549 es variable para cada mes; en enero (48,57% y 92,86%), en abril, julio y octubre valores mayores al 90% para *ASHRAE* y NTP



549. En baja ocupación y ventilación media (M2), en enero (71,43% y 94,29%), en abril, julio y octubre 90% para *ASHRAE* y NTP 549. En baja ocupación y ventilación máxima (M1) en todos los meses de análisis se tiene valores 100% para *ASHRAE* y NTP 549. En el contexto de la pandemia del COVID-19 es recomendable mantener la ventilación máxima todo el tiempo (M1) para lograr el 100% de horas de CO<sub>2</sub> dentro de las recomendaciones dadas por las normativas. Se concluye que las aulas M101 y M110 son ideales para el desarrollo de actividades escolares y prevención del COVID-19 en condición de baja ocupación y baja ventilación(M1).

Se concluye que, en temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo y humedad relativa los índices estadísticos para el equipo Extech CO240 se encuentran dentro del rango permitido (RMSE [0 – 30%] y MAE [0-10%]) según Veeresamy [29] y Willmott [30]. Cabe recalcar que los errores relativos (MAE) en temperatura de bulbo seco es 5,22%, bulbo húmedo es 4,25% y en humedad relativa es 13,79% (tabla 3.1.); entonces este equipo comprado a bajo costo toma medidas con errores aceptables en condiciones de altitud, temperatura y presión diferentes a las condiciones estándar. Además, el índice estadístico MBE (tabla 3.1.) indica que el equipo Extech CO240 mide valores de temperatura superiores al valor real y en humedad relativa valores menores al real, sin embargo las variables medidas y resultados simulados tienen relación fuerte por tener un R cuadrado cercano a 1 (TBS igual a 0,97, TBH de 0,93 y HR de 0,95).

De acuerdo con la validación de las simulaciones realizadas con el software *DesignBuilder* para reproducir las mediciones tomadas en el ambiente interior de la biblioteca central en los cinco días de una semana; se concluye que el modelo desarrollado presenta un error relativo (tabla 3.3., MAE) de 4,61% en temperatura, 5,25% en humedad relativa y 17,09% en CO<sub>2</sub>. El índice estadístico MBE muestra que los valores simulados de temperatura y humedad relativa se encuentran subestimados respecto a los datos medidos, y en el caso del CO<sub>2</sub> se encuentran sobreestimados (ver figura 3.15 índice estadístico MBE). Además, la tendencia de los resultados simulados y valores medidos son similares en temperatura interna seca y humedad relativa (figuras 3.10, 3.11) mientras que en el comportamiento del CO<sub>2</sub> se observa cierta diferencia entre los valores simulados y medidos (figura 3.12.). En este contexto el software *DesignBuilder* simula confort térmico con mayor precisión y exactitud que la simulación de componentes contaminantes del ambiente (CO<sub>2</sub>).

Se concluye que las condiciones metabólicas de las personas en conjunto con el clima exterior determinan el confort térmico en las aulas cuando el sitio está funcionando en máxima ocupación (35 personas), pero en condición de baja ocupación (9 personas) la

temperatura y humedad relativa son influenciados por el ambiente exterior (archivo meteorológico).

## 4.2. Recomendaciones

Se recomienda que la metodología de medición con el equipo Extech CO240 se la realice de acuerdo a la especificación de *ASHRAE 55 – 2010*, apartado 7. El medidor debe ubicarse a 0,6m de altura sobre el piso para ocupantes sentados, localizado en el centro del área de evaluación y ubicado lejos de cualquier superficie para permitir una circulación de aire adecuada alrededor de los sensores de medición.

Se recomienda que para estudios de la calidad del aire interior es conveniente crear una mezcla de aire uniforme durante la toma de medidas para reducir el error relativo en la validación de resultados del CO<sub>2</sub>. Una manera de crear uniformidad en el aire es mediante el uso de ventiladores posicionados en los extremos del lugar.

Se recomienda que la toma de medidas con el psicrómetro se lo realice en diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa para obtener un rango adecuado de comparación de medidas. Además, el instrumento debe localizarse en lugares sin superficies radiantes y con velocidad del aire constante.

Se recomienda comparar con archivos históricos los datos entre las estaciones meteorológicas disponibles del lugar de estudio y seleccionar la estación que se considere más confiable (si no es posible evaluar la confiabilidad mediante mediciones expresas) y/o más cercana. En el presente estudio se utilizaron los datos de la estación meteorológica de la Secretaría del Ambiente ubicada en el centro de Quito (terrace de la Radio Municipal) y la estación de SCINERGY ubicada en la EPN (terrace de la FIM), siendo SCINERGY la más conveniente para el estudio.

Se recomienda utilizar la medición y monitoreo de CO<sub>2</sub> en espacios interiores como un indicador de ventilación para prevenir el riesgo de transmisión de aerosoles que pueden contener COVID-19 y otras enfermedades respiratorias. Se recomienda tomar como referencia el valor calculado de 892 ppm de la normativa *ASHRAE* debido a que considera la tasa de ventilación por persona de 10 l/s para asegurar una buena calidad de aire interior.

En las aulas de la FIM se observa que las ventanas abatibles de eje horizontal no producen variaciones significativas en el comportamiento de IAQ y confort térmico. Se conoce que la ventilación por la abertura de puertas es considerable por lo que se recomienda abrir la puerta durante 1 hora para renovar el aire del lugar y mantener los niveles de CO<sub>2</sub> en los límites establecidos por las normativas después de que las aulas han sido usadas.

Se recomienda utilizar un sistema de acondicionamiento de aire con enfriamiento evaporativo de tal forma que al inyectar vapor de agua se aumente la humedad relativa de las aulas y se disminuya la temperatura lo que aumentaría las horas de confort térmico en el mes de enero para las aulas críticas (M201, M101 y M110). De igual forma, para la IAQ se recomienda que las cuatro ventanas estén siempre abiertas en aulas críticas en la condición de alta ocupación y baja ventilación(M4) para tener un número de horas de CO<sub>2</sub> aceptable mayor al 50% según ASHRAE y 60% según NTP 549. Se recomienda evaluar el efecto de un sistema de ventilación pasivo en conjunto con el enfriamiento evaporativo de tal forma que se controle la temperatura y la humedad relativa y se facilite la circulación de aire en las aulas críticas con el fin aumentar las horas de confort térmico (*ASHRAE 55*) y el número de horas aceptables de CO<sub>2</sub> (*ASHRAE Handbook y NTP 549*).

### **4.3. Trabajos futuros**

Se pueden desarrollar trabajos futuros con el objetivo de analizar el comportamiento de la IEQ en las aulas de la FIM considerando el diseño de un sistema de acondicionamiento de aire con enfriamiento evaporativo y proponer soluciones a la problemática de confort ambiental y concentración de CO<sub>2</sub> en las aulas de la FIM

## Referencias Bibliográficas

- [1] P. T. B. S. Branco, M. C. M. Alvim-Ferraz, F. G. Martins, and S. I. V. Sousa, "Quantifying indoor air quality determinants in urban and rural nursery and primary schools," *Environ. Res.*, vol. 176, no. June, p. 108534, 2019.
- [2] M. A. Soomro, S. A. Memon, M. M. Shaikh, and A. Channa, "Indoor air CO<sub>2</sub> assessment of classrooms of educational institutes of hyderabad city and its comparison with other countries," *5Th Int. Conf. Energy, Environ. Sustain. Dev.*, vol. 2119, no. July, p. 020014, 2019.
- [3] G. Erlandson, S. Magzamen, E. Carter, J. L. Sharp, S. J. Reynolds, and J. W. Schaeffer, "Characterization of indoor air quality on a college campus: a pilot study," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, no. 15, p. 2721, 2019.
- [4] A. Caron, N. Redon, P. Coddeville, and B. Hanoune, "Identification of indoor air quality events using a K-means clustering analysis of gas sensors data," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 297, no. November 2018, p. 126709, 2019.
- [5] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Standard 62.1-2013: Ventilation for acceptable indoor air quality. ASHRAE Atlanta, GA; 2013
- [6] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Standard 55--2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE. Atlanta, GA; 2010.
- [7] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Handbook Fundamentals 2017: Indoor Environmental Quality. ASHRAE. Atlanta, GA; 2017.
- [8] Convenio Miduvi – Cámara de la Construcción de Quito. Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-11: Eficiencia energética en la construcción en Ecuador. Ecuador; 2011.
- [9] OPS, "7 millones de muertes ocurren cada año debido a contaminación atmosférica," *OPS*, 2014. [Online]. Available: [https://www.paho.org/ecu/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1172:7-millones-muertes-ocurren-cada-ano-debido-contaminacion-atmosferica-segun-oms&Itemid=360](https://www.paho.org/ecu/index.php?option=com_content&view=article&id=1172:7-millones-muertes-ocurren-cada-ano-debido-contaminacion-atmosferica-segun-oms&Itemid=360). [Accessed: 15-Jan-2019].

- [10] G. Alcántara, "Dialnet-LaDefinicionDeSaludDeLaOrganizacionMundialDeLaSalu-2781925," *Sapiens, Rev. Univ. Investig.*, no. 1, pp. 93–107, 2008.
- [11] A. Persily, L. de Jonge, "Carbon dioxide generation rates for building occupants", *Wiley*, vol.1, no.1, pp. 871-874, March 2017.
- [12] D. Ortega, "Implementación de un prototipo para el monitoreo de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y metano (CH<sub>4</sub>) en lugares residenciales utilizando el sistema operativo Android y Arduino", Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, EPN, Quito, Ecuador, 2017.
- [13] A. Carrillo. (2020, Mayo 15). El gas del cambio climático marca un récord nunca visto en la historia humana [On line]. Available: <https://www.lavanguardia.com/natural/20190514/462242832581/concentracion-dioxido-cabono-co2-atmosfera-bate-record-historia-humanidad.html>.
- [14] F. Ferrelli, and M.C. Piccolo, "Estudio del confort climático a escala mico-local", *Bitacora 27*, vol.1, pp. 91-100, Junio 2017.
- [15] J.G. Barros, y A.Y. Troncoso, "Atlas climatológico del Ecuador", Tesis, Facultad de Ingeniería Civil, EPN, Quito, Ecuador, 2010.
- [16] G. Guevara, G. Soriano, and I.M. Rodríguez, "Thermal comfort in university classrooms: An experimental study in the tropics", *Building and Environment*, vol. 1, pp. 1-13, november 2020.
- [17] F. Portilla, *Agroclimatología del Ecuador*, Primera edición, Quito: Escuela Politécnica Salesiana, Editorial Universitaria Abya- Yala, 2018.
- [18] M. A. Eahman, C. Hartmann, A.M. Reischl, M.F. Strachwitz, H. Paeth, H. Pretzsch, S. Pauleit, and T. Rotzer, "Tree cooling effects and human termal comfort under contrasting species and sities", *Agricultural and Dorest Meteorology*, vol1, pp. 2-13, August 2019.
- [19] W. Wang, and Z. Tian, and Y. Ding, "Investigation of energy factors in energy consumption and termal comfort for a passsive solar house with wáter", *Energy Buildings*, vol. 1, pp. 2-6, May 2013.
- [20] M.Haase, and A. Amato, "An investigation of the potential for natural ventilation and building orientation to achieve thermal comfort in warm and humid climates", *Solar Energy*, vol1, pp. 2-11, October 2008.

- [21] D.G. Leo Samuel, and K. Dharmasastha, and S. M. Shiva Nagendra, and M. Prakash Maiya, "Thermal comfort in traditional buildings composed of local and modern construction materials", *IJSBE*, vol. 1, pp. 463-475, August 2017.
- [22] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), "Indoor Air Quality Guide", ASHRAE, Atlanta, GA; 2009.
- [23] J. Ferrer, "Efecto de la masa térmica de la envolvente sobre la climatización de edificaciones", M.S. Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica y Electrónica, UANL, Monterrey, México, 2012
- [24] H. Monárdez, "Inercia térmica de viviendas", Tesis, Departamento de Ingeniería Civil, USACH, Santiago de Chile, Chile, 2007.
- [25] PK. Latha, and Y. Darshana, and V. Venugopal, "Role of building material in thermal comfort in tropical climates-A review", *JOBE*, vol.1, pp. 1-43, June 2015.
- [26] C. Abishdid, "Air Infiltration Through building envelopes A review", *Journal of Building Physics*, vol1, pp. 2-37, January 2012.
- [27] Design Builder España. Conversor de epw a csv [On line]. Available: <https://ecoeficiente.es/conversor-epw-a-csv/>
- [28] A. Al-Hemoud, L. Al-Awadi, M. Al-Rashidi, K. A. Rahman, A. Al-Khayat, and W. Behbehani, "Comparison of indoor air quality in schools: Urban vs. Industrial 'oil & gas' zones in Kuwait," *Build. Environ.*, vol. 122, pp. 50–60, 2017.
- [29] R.Veerassamy, and H. Rajak, and A. Jain, and S. Sivadasan, and C.P. Varghese, and R.K.A. Agrawal, "Ravichandran Veerasamy, "Validation of QSAR Models-Strategies and Importance Validation Of QSAR Models- Strategies and importance", *Journal of Drug Design and Discovery*, vol2, no.3, pp. 511-519, September 2011.
- [30] J. Willmott, and K. Matsuura, "Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance", *Climatic Research*, vol.1, pp. 79-82, December 2005.
- [31] C. A. Gueymard, "A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 1024–1034, Nov. 2014.
- [32] R.J. Stone, "improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models", *Solar Energy*, vol.51, pp. 289-291, October 1993.

- [33] CEPRA XIV-2020, "Monitoreo y análisis de la calidad del ambiente interior y sus efectos cognitivos sobre los estudiantes en aulas de instituciones de educación superior del Ecuador", Formulario CEPRA, 2020.
- [34] F. Ma, and Ch. Zhan, and X. Xu, "Investigation and evaluation of winter indoor air quality of primary school in server cold weather areas of China", *energies*, vol.12, pp. 2-19, April 2019.
- [35] Z. Peng, and J.L. Jiménez, "Exhaled CO<sub>2</sub> as a COVID 19 infection risk proxy for different indoor environments and activities", *Environmental Sci. Technol. Lett.* 2021, vol.8, 392-397, May 2021.
- [36] A. Ordóñez, "Manual de ayuda DesignBuilder en español", DesignBuilder Ltd., Chile, Marzo, 2017.
- [37] Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción, CITEC UBB, "Manual de hermeticidad al aire de edificaciones", Chile, Diciembre 11, 2011.
- [38] ANSI/ASHRAE, "ASHRAE Guideline 14-2002 Measurement of Energy and Demand Savings," ASHRAE, vol. 8400, p. 170, 2002
- [39] C. Willmott, K Matsuura, "Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance," *Climate Research*, vol. 30, p. 79-82, 2005.
- [40] S. Mishra, P. Raviganesh, J. Schuetter, D. Mooney, and J. He, "Simplified Predictive Models for CO<sub>2</sub> Sequestration Performance Assessment," vol. 16, p. 9051, 2014.

## ANEXO I. Metabolic rates (tasa metabólica) para actividades varias

La siguiente figura I.1. corresponde a los valores típicos de tasa metabólicas en varias actividades, se usa para expresar la cantidad de calor generado por el cuerpo cuando se realiza una actividad física.

<b>Table 4 Typical Metabolic Heat Generation for Various Activities</b>		
	<b>W/m<sup>2</sup></b>	<b>met*</b>
<b>Resting</b>		
Sleeping	40	0.7
Reclining	45	0.8
Seated, quiet	60	1.0
Standing, relaxed	70	1.2
<b>Walking (on level surface)</b>		
3.2 km/h (0.9 m/s)	115	2.0
4.3 km/h (1.2 m/s)	150	2.6
6.4 km/h (1.8 m/s)	220	3.8
<b>Office Activities</b>		
Reading, seated	55	1.0
Writing	60	1.0
Typing	65	1.1
Filing, seated	70	1.2
Filing, standing	80	1.4
Walking about	100	1.7
Lifting/packing	120	2.1
<b>Driving/Flying</b>		
Car	60 to 115	1.0 to 2.0
Aircraft, routine	70	1.2
Aircraft, instrument landing	105	1.8
Aircraft, combat	140	2.4
Heavy vehicle	185	3.2
<b>Miscellaneous Occupational Activities</b>		
Cooking	95 to 115	1.6 to 2.0
Housecleaning	115 to 200	2.0 to 3.4
Seated, heavy limb movement	130	2.2
<b>Machine work</b>		
sawing (table saw)	105	1.8
light (electrical industry)	115 to 140	2.0 to 2.4
heavy	235	4.0
Handling 50 kg bags	235	4.0
Pick and shovel work	235 to 280	4.0 to 4.8
<b>Miscellaneous Leisure Activities</b>		
Dancing, social	140 to 255	2.4 to 4.4
Calisthenics/exercise	175 to 235	3.0 to 4.0
Tennis, singles	210 to 270	3.6 to 4.0
Basketball	290 to 440	5.0 to 7.6
Wrestling, competitive	410 to 505	7.0 to 8.7

*Sources:* Compiled from various sources. For additional information, see Buskirk (1960), Passmore and Durnin (1967), and Webb (1964).  
\*1 met = 58.1 W/m<sup>2</sup>

Figura I. 1. Tasas metabólicas para varias actividades.  
(Fuente: [7])



## Aislamiento por vestimenta en unidades clo

<b>Table 9 Garment Insulation Values</b>					
Garment Description <sup>a</sup>	$I_{clu,p}$ clo <sup>b</sup>	Garment Description <sup>a</sup>	$I_{clu,p}$ clo <sup>b</sup>	Garment Description <sup>a</sup>	$I_{clu,p}$ clo <sup>b</sup>
<b>Underwear</b>		Long-sleeved, flannel shirt	0.34	Long-sleeved (thin)	0.25
Men's briefs	0.04	Short-sleeved, knit sport shirt	0.17	Long-sleeved (thick)	0.36
Panties	0.03	Long-sleeved, sweat shirt	0.34	<b>Dresses and Skirts<sup>c</sup></b>	
Bra	0.01	<b>Trousers and Coveralls</b>		Skirt (thin)	0.14
T-shirt	0.08	Short shorts	0.06	Skirt (thick)	0.23
Full slip	0.16	Walking shorts	0.08	Long-sleeved shirtdress (thin)	0.33
Half slip	0.14	Straight trousers (thin)	0.15	Long-sleeved shirtdress (thick)	0.47
Long underwear top	0.20	Straight trousers (thick)	0.24	Short-sleeved shirtdress (thin)	0.29
Long underwear bottoms	0.15	Sweatpants	0.28	Sleeveless, scoop neck (thin)	0.23
<b>Footwear</b>		Overalls	0.30	Sleeveless, scoop neck (thick)	0.27
Ankle-length athletic socks	0.02	Coveralls	0.49	<b>Sleepwear and Robes</b>	
Calf-length socks	0.03	<b>Suit Jackets and Vests (Lined)</b>		Sleeveless, short gown (thin)	0.18
Knee socks (thick)	0.06	Single-breasted (thin)	0.36	Sleeveless, long gown (thin)	0.20
Panty hose	0.02	Single-breasted (thick)	0.44	Short-sleeved hospital gown	0.31
Sandals/thongs	0.02	Double-breasted (thin)	0.42	Long-sleeved, long gown (thick)	0.46
Slippers (quilted, pile-lined)	0.03	Double-breasted (thick)	0.48	Long-sleeved pajamas (thick)	0.57
Boots	0.10	Sleeveless vest (thin)	0.10	Short-sleeved pajamas (thin)	0.42
<b>Shirts and Blouses</b>		Sleeveless vest (thick)	0.17	Long-sleeved, long wrap robe (thick)	0.69
Sleeveless, scoop-neck blouse	0.12	<b>Sweaters</b>		Long-sleeved, short wrap robe (thick)	0.48
Short-sleeved, dress shirt	0.19	Sleeveless vest (thin)	0.13	Short-sleeved, short robe (thin)	0.34
Long-sleeved, dress shirt	0.25	Sleeveless vest (thick)	0.22		

<sup>a</sup>"Thin" garments are summerweight; "thick" garments are winterweight.     
 <sup>b</sup>1 clo = 0.155 (m<sup>2</sup>·K)/W     
 <sup>c</sup>Knee-length

Figura I. 2. Aislamiento por vestimenta  
(Fuente: [7])

## ANEXO II. Datos medidos con el equipo Extech CO240 en la Biblioteca Central de la EPN

A continuación, se muestra las gráficas obtenidas del equipo Extech CO240 en la toma de datos de temperatura del aire interior, humedad relativa y CO<sub>2</sub> en la biblioteca central. Cada gráfica se muestra por día de medición.



Figura II. 1. Datos tomados en la Biblioteca Central el día 12 de febrero del 2020. (Fuente: Autores)



Figura II. 2. Datos tomados en la Biblioteca Central el día 17 de febrero del 2020. (Fuente: Autores)

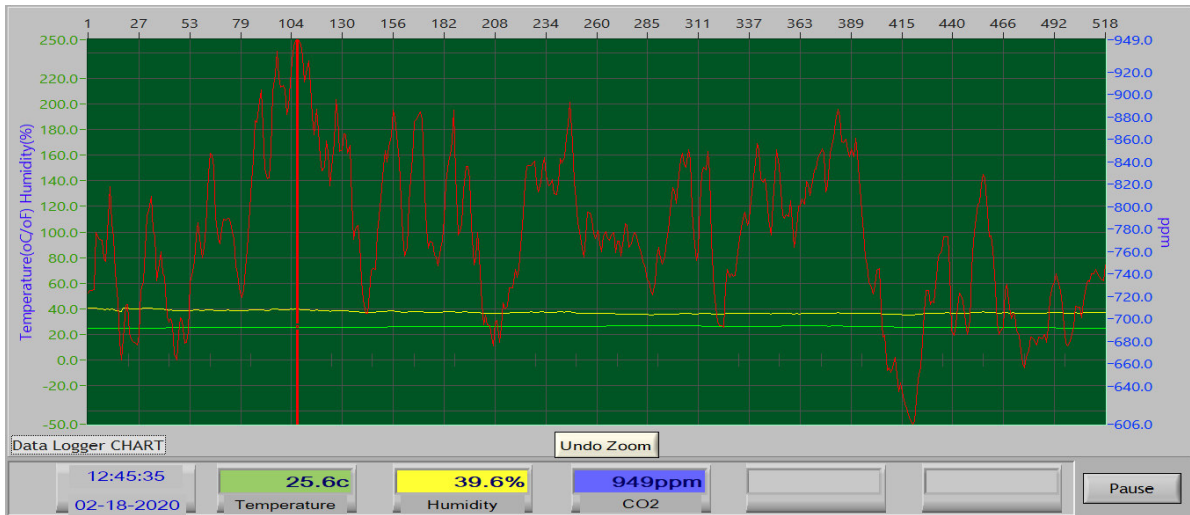


Figura II. 3. Datos tomados en la Biblioteca Central el día 18 de febrero del 2020.  
(Fuente: Autores)

## ANEXO III. Condiciones y datos de entrada para la simulación de la Biblioteca Central de la EPN

Las siguientes tablas corresponden a la configuración del modelo de la Biblioteca Central en el software *DesignBuilder*, tanto para configuración, parámetros de entradas y condiciones de simulación. Se ha realizado tablas independientes para cada pestaña disponible en el software.

Tabla III. 1. Condiciones y datos de entrada para el software *DesignBuilder*, en la pestaña sitio.

<b>Sitio</b>	
<b>Datos de sitio</b>	
Plantilla Sitio	Quito
<b>Ubicación</b>	
Latitud (°)	-0,21
Longitud (°)	-78,49
<b>Detalles del Sitio</b>	
Elevación sobre el nivel del mar [m]	2815
Nivel de exposición al viento	Normal
Orientación (°C)	E 58° S [Google Earth]
CO <sub>2</sub> y contaminantes del aire exterior	Activado
Concentración CO <sub>2</sub> atmosférico [ppm]	Concentración de CO <sub>2</sub> en la atmósfera Valor: 416,21
<b>Zona Horaria</b>	
Hora	(GMT-05:00) Bogotá, Lima, Quito
<b>Datos climáticos para simulación</b>	
Archivo meteorológico	ECU_QUITO_IWEC_EPN_HORARIO.epw Estación meteorológica: Scinergy EPN
Día Inicial de simulación	Jueves

(Fuente: Autores)

Tabla III. 2. Condiciones y datos de entrada para el software *DesignBuilder*, en la pestaña edificio.

<b>Edificio</b>	
<b>Actividad</b>	
Nombre	Sala de estudio general
Tipo de zona	Acondicionada Zona incluida en cálculos térmicos
<b>Área de suelos y volúmenes</b>	
Área de suelo ocupado (m2)	208,11
Volumen ocupado (m3)	728,4
<b>Ocupación</b>	
Número de personas máximo	168
Programación	Activado "Horario Biblioteca CEPN"
Condiciones metabólicas	Tasa metabólica promedio calculada: 1 met Tasa de generación de CO <sub>2</sub> : 4,41x10 <sup>-8</sup> (m3/s-W)
Vestimenta	Genérica (calculada) Aislamiento: 0,9 clo
<b>Computadoras</b>	
Densidad de potencia	2,88 W/m2 (calculada)
Programación	"Horario de funcionamiento de computadoras sala general BC"
Fracción radiante	0,2

(Fuente: Autores)

Tabla III. 3. Condiciones y datos de entrada para el software *DesignBuilder*, en la pestaña edificio.

<b>Cerramientos</b>	
Nombre	"Plantilla Cerramientos del proyecto"
<b>Cerramientos</b>	
Muros exteriores	"Muro exterior BC EPN"
Cubiertas planas	"Techo BC EPN"
Suelo	"Suelo sobre terreno del proyecto BC EPN"
Sub-superficies	Interiores (ventanas): "Partición de vidrio 6mm"
<b>Estanqueidad del aire</b>	
Modelar infiltración	Activado
Grietas	Medio 0,7 ren/h (ASHRAE HANDBOOK, chapter 16)

(Fuente: Autores)

Tabla III. 4. Condiciones y datos de entrada para el software *DesignBuilder*, en la pestaña aberturas.

<b>Aberturas</b>	
Nombre	"Plantilla de acristalamiento del proyecto"
<b>Ventanas exteriores</b>	
Tipo de acristalamiento	vidrio Sgl Clr 6mm
Distribución de acristalamiento	Preferred height 1.5m, 30% glazed
<b>Dimensiones</b>	
Tipo	Llenar superficie 100%
Profundidad de retranqueo exterior (m)	0,08
Marco	Material: aluminio window frame Ancho de marco (m): 0,04 Proyección interior del marco (m): 0,001 Proyección exterior del marco (m): 0,001
Divisores	Material: aluminio window frame Ancho de marco: 0,02 Proyección interior del marco (m): 0,001 Proyección exterior del marco (m): 0,001
Sombreado de ventanas	Desactivado
Ventanas interiores	No
Ventanas exteriores	Número: 6 Apertura para ventilación: 65% (calculada) Programación: Independiente para cada ventana
Puertas interiores	Número: 13 Apertura para ventilación: 100% Programación: Independiente para cada puerta
Puertas exteriores	Número: 3 Apertura para ventilación: 100 Programación: Independiente para cada ventana

(Fuente: Autores)

Tabla III. 5. Condiciones y datos de entrada para el software *DesignBuilder*, en la pestaña iluminación.

<b>Iluminación</b>	
Nombre	"Fluorescent"
Iluminación general	Activado
Densidad de potencia [W/m <sup>2</sup> ]	8,65 (calculada)
Programación	"Horario de funcionamiento luces EPN"
Tipo de luminaria	Empotrada
Fracción radiante	0,37

(Fuente: Autores)

Tabla III. 6. Condiciones y datos de entrada para el software *DesignBuilder*, en opciones del modelo.

<b>Opciones del modelo</b>	
<b>Datos</b>	
Datos de cerramientos y acristalamiento	General
Datos de ganancias	Simplificadas
Definición de ganancias por ocupación	Número de personas
Cálculo de ganancias latentes por ocupación	Cálculo dinámico
Definición de ganancias por equipos	Densidad de potencia
Definición de ganancias por iluminación	Densidad de potencia
Sincronización	Programación
Ventilación natural e infiltración	Calculada [ren/h]
Método de estanqueidad del aire	Control deslizante
Superficies de sombreado	Activado
<b>Avanzado</b>	
<b>Simplificación</b>	
Agrupar zonas por selección	Activado
Ventilación natural	
Modelar fujo de aire a través de huecos y particiones virtuales	Activado
Coeficiente de descarga para puertas abiertas y huecos	0,65
<b>Iluminación</b>	
Método de iluminación natural	Detallado

(Fuente: Autores)

## ANEXO IV. Modelado 3D de la planta baja, segundo y tercer piso de la FIM

En las figuras siguientes se observa el modelado 3D de la facultad de Ingeniería Mecánica en el software *DesignBuilder*. Se muestra la vista superior y axonométrica para la planta baja, segundo piso y tercer piso. En la vista superior se observa la zonificación de cada sitio y en la vista axonométrica lo materiales usados para cerramientos del edificio.

### Planta baja

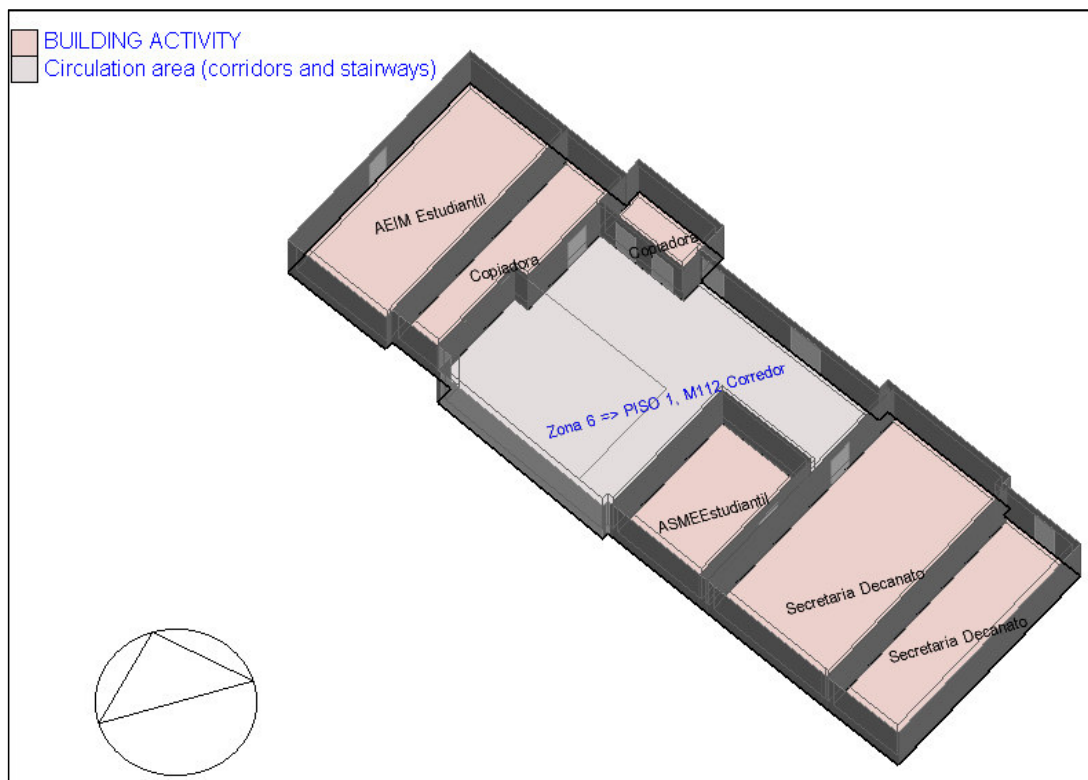


Figura IV. 1. Modelo de la planta baja de la Facultad de Ingeniería Mecánica en *DesignBuilder* (Fuente: Autores)



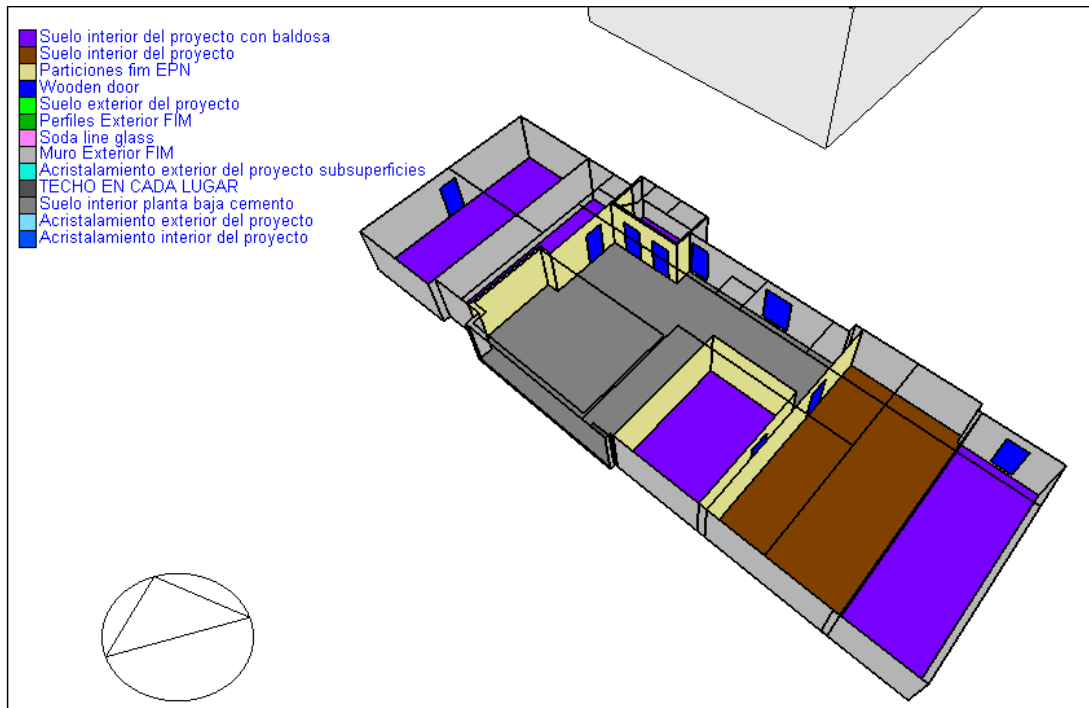


Figura IV. 2. Modelo de la planta baja (vista axonométrica) de la Facultad de Ingeniería Mecánica en *DesignBuilder*  
(Fuente: Autores)

### Segundo piso



Figura IV. 3. Modelo del segundo piso de la Facultad de Ingeniería Mecánica en *DesignBuilder*  
(Fuente: Autores)

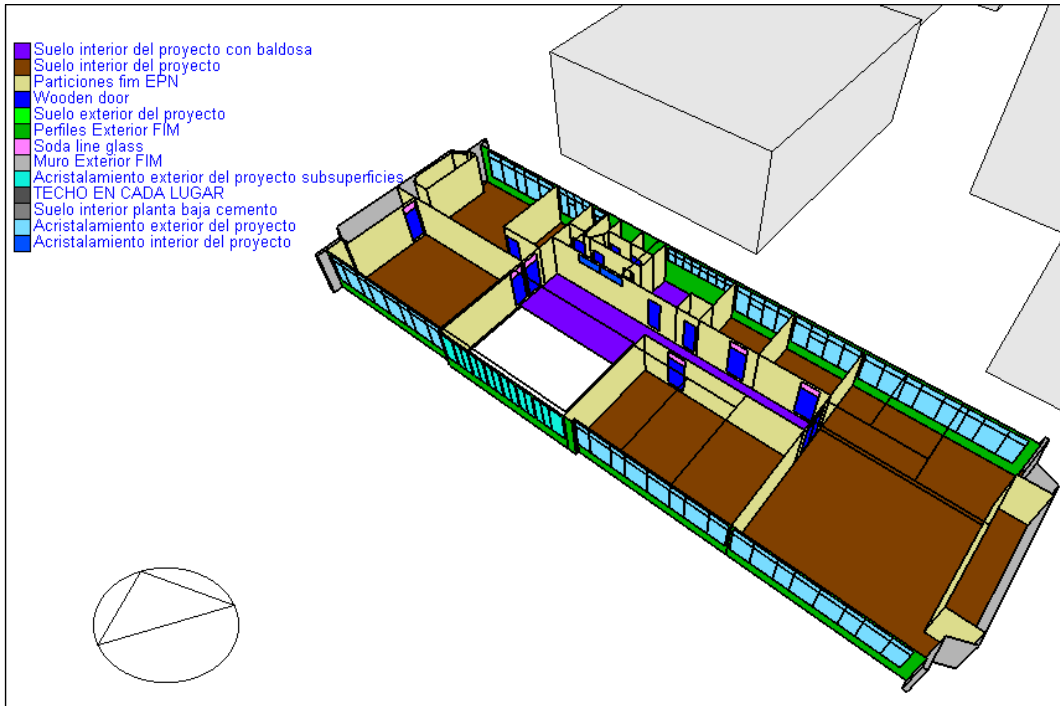


Figura IV. 4. Modelo del segundo piso (vista axonométrica) de la Facultad de Ingeniería Mecánica en *DesignBuilder*  
(Fuente: Autores)

### Tercer piso

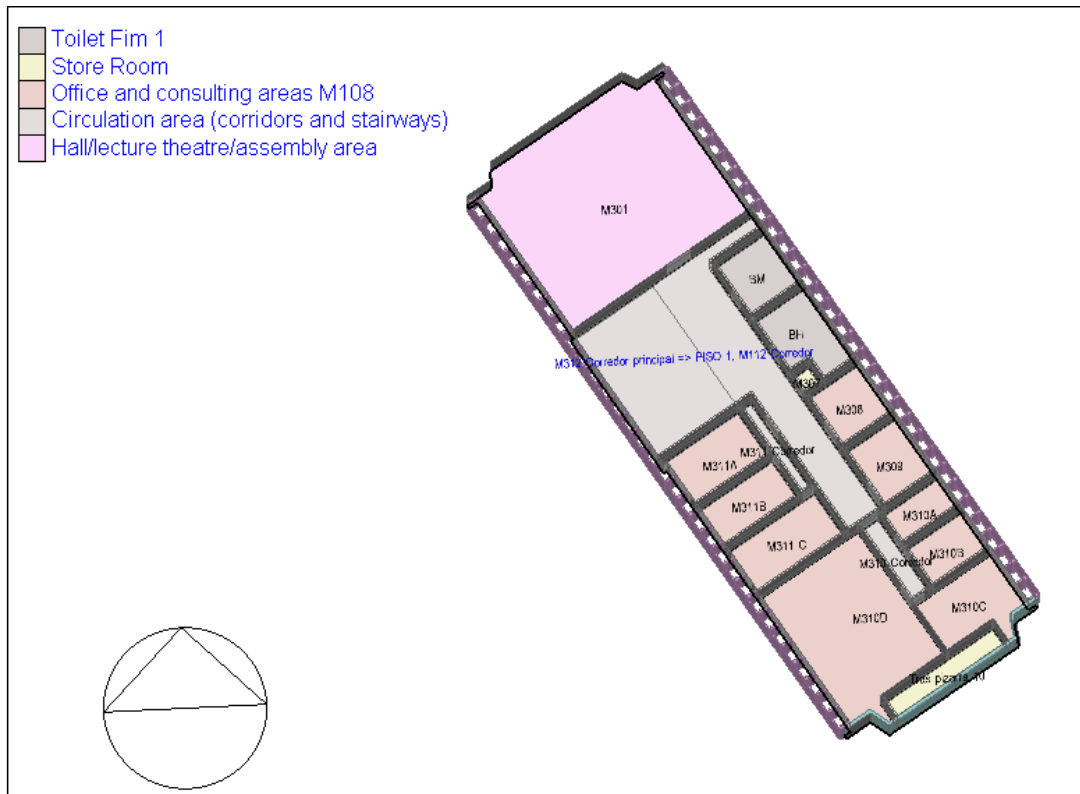


Figura IV. 5. Modelo del tercer piso de la Facultad de Ingeniería Mecánica en *DesignBuilder*  
(Fuente: Autores)

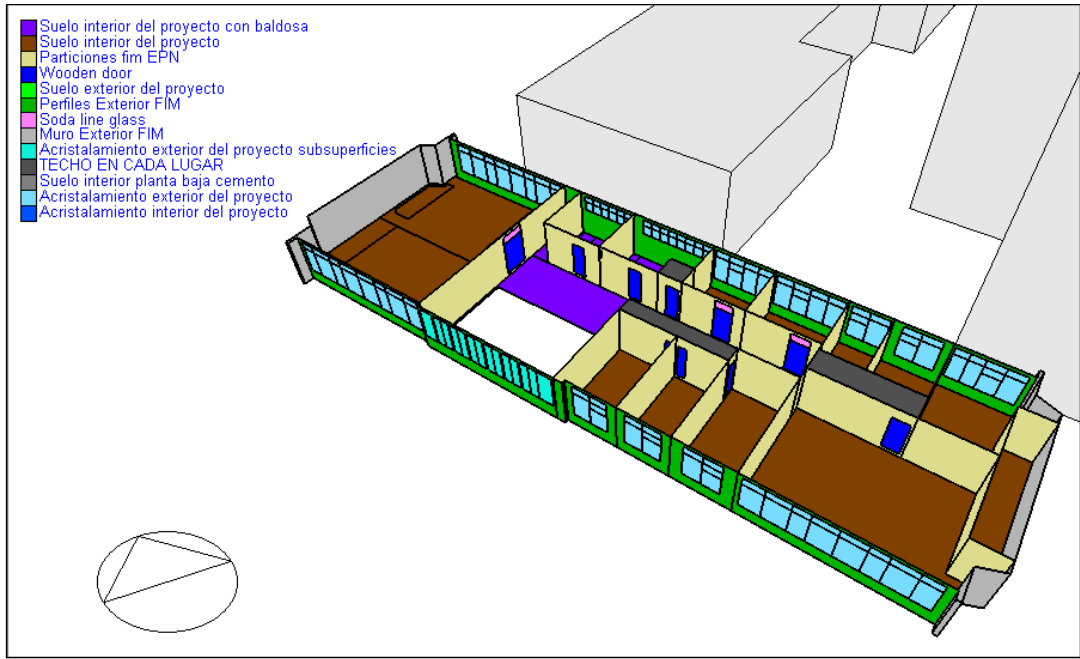
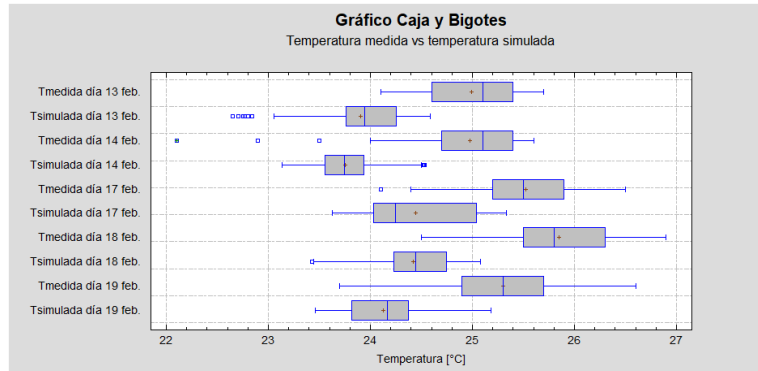


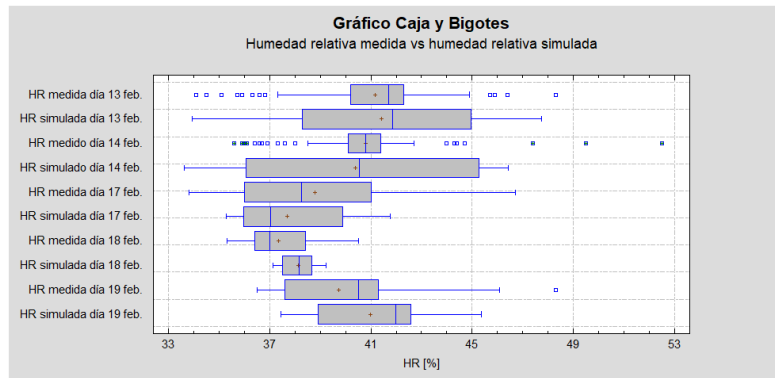
Figura IV. 6. Modelo del tercer piso (vista axonométrica) de la Facultad de Ingeniería Mecánica en *DesignBuilder* (Fuente: Autores)

## ANEXO V. Estadística Descriptiva

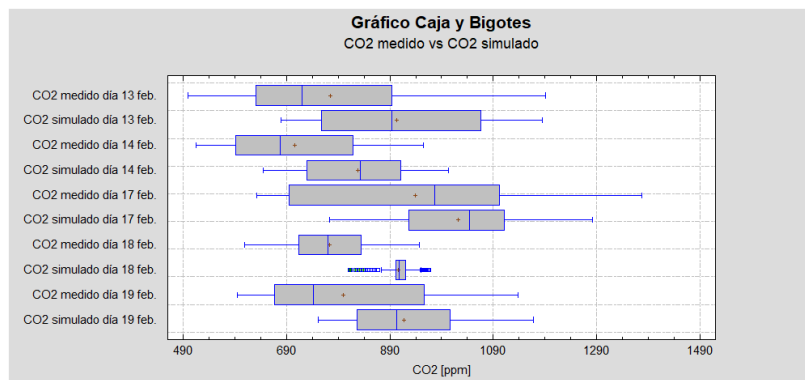
Diagrama de cajas y bigotes de Tint. seca medida y simulada [°C], HR [%] medida y simulada y CO<sub>2</sub> [ppm] medido y simulado, para cada día de medición.



(a)



(b)

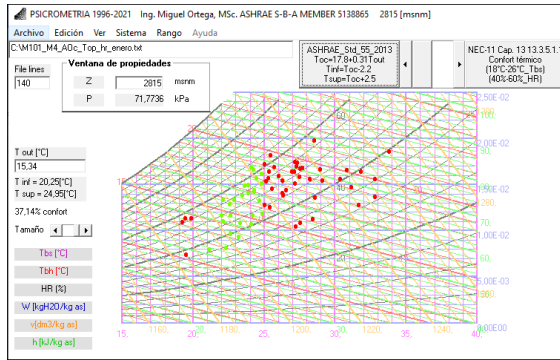


(c)

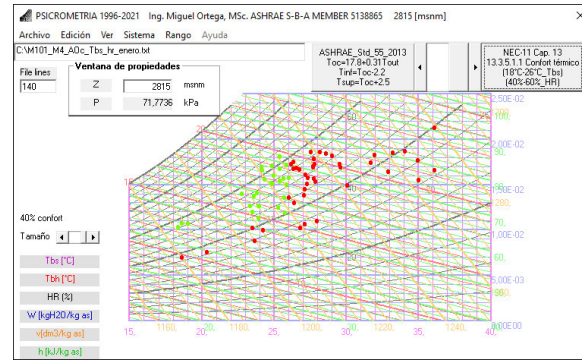
Figura V.1. Gráficas de caja y bigote de Tint.seca medida y simulada [°C] (a), HR [%] medida y simulada (b) y CO<sub>2</sub> [ppm] medido y simulado (c), para cada día de medición.  
(Fuente: autores)

# ANEXO VI. Cartas psicrométricas y confort térmico

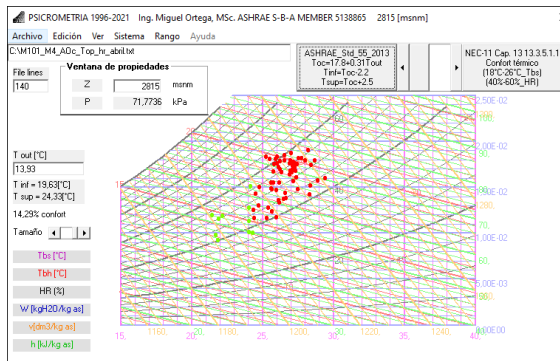
## M101 alta ocupación, baja ventilación (ventanas cerradas, puerta cerrada), M4



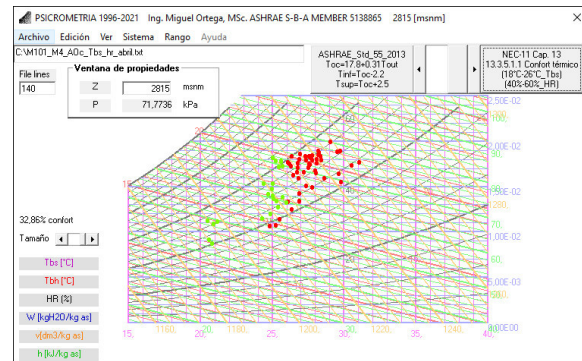
(a)



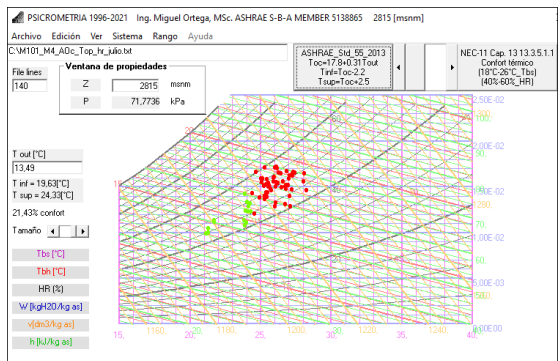
(b)



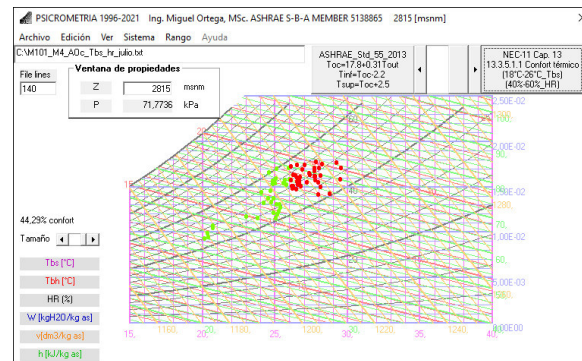
(c)



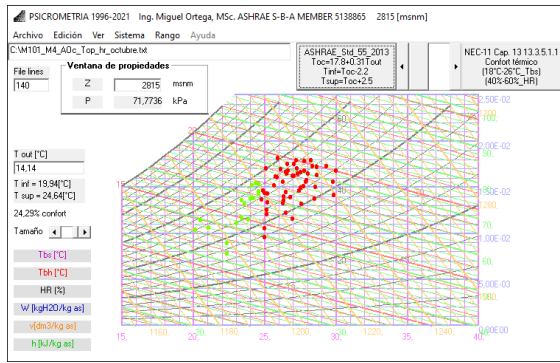
(d)



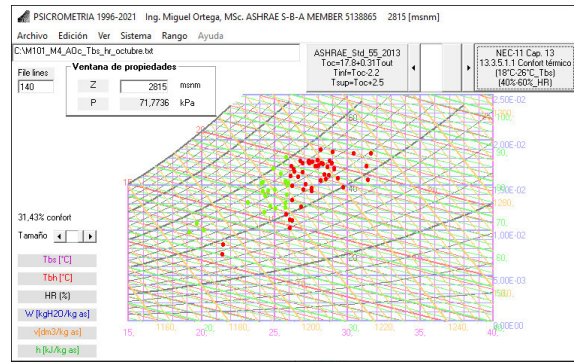
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura VI.1. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de *ASHRAE* (izquierda) y modelo recomendado por *NEC 11* (derecha), aula M101, alta ocupación y baja ventilación M4 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).  
(Fuente: Autores)

## M101 alta ocupación, media ventilación (4 ventanas abiertas, puerta cerrada), M2

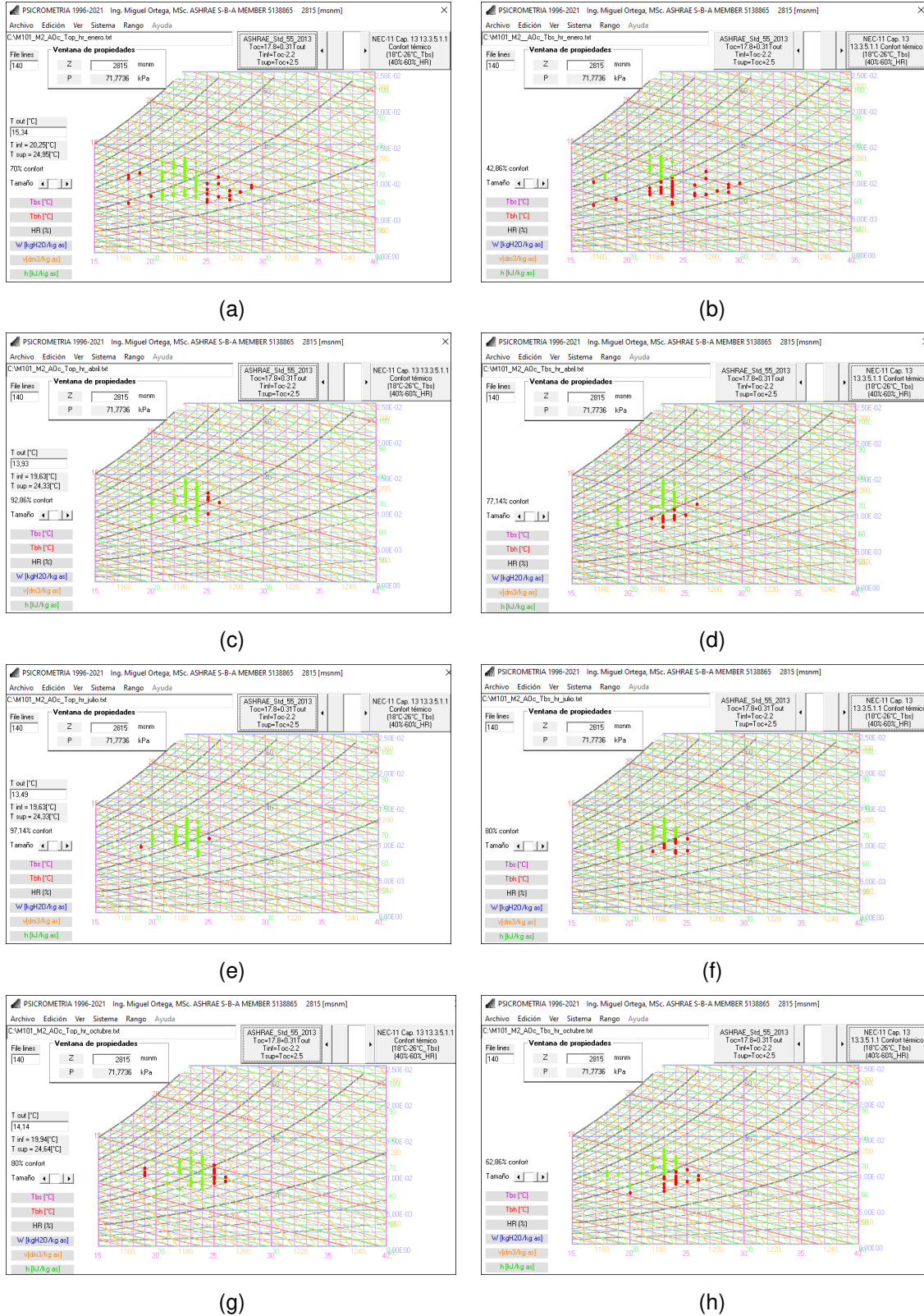


Figura VI.2. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M10, alta ocupación y media ventilación M2 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

(Fuente: Autores)

# M101 alta ocupación, máxima ventilación (ventanas abiertas, puertas abiertas), M1

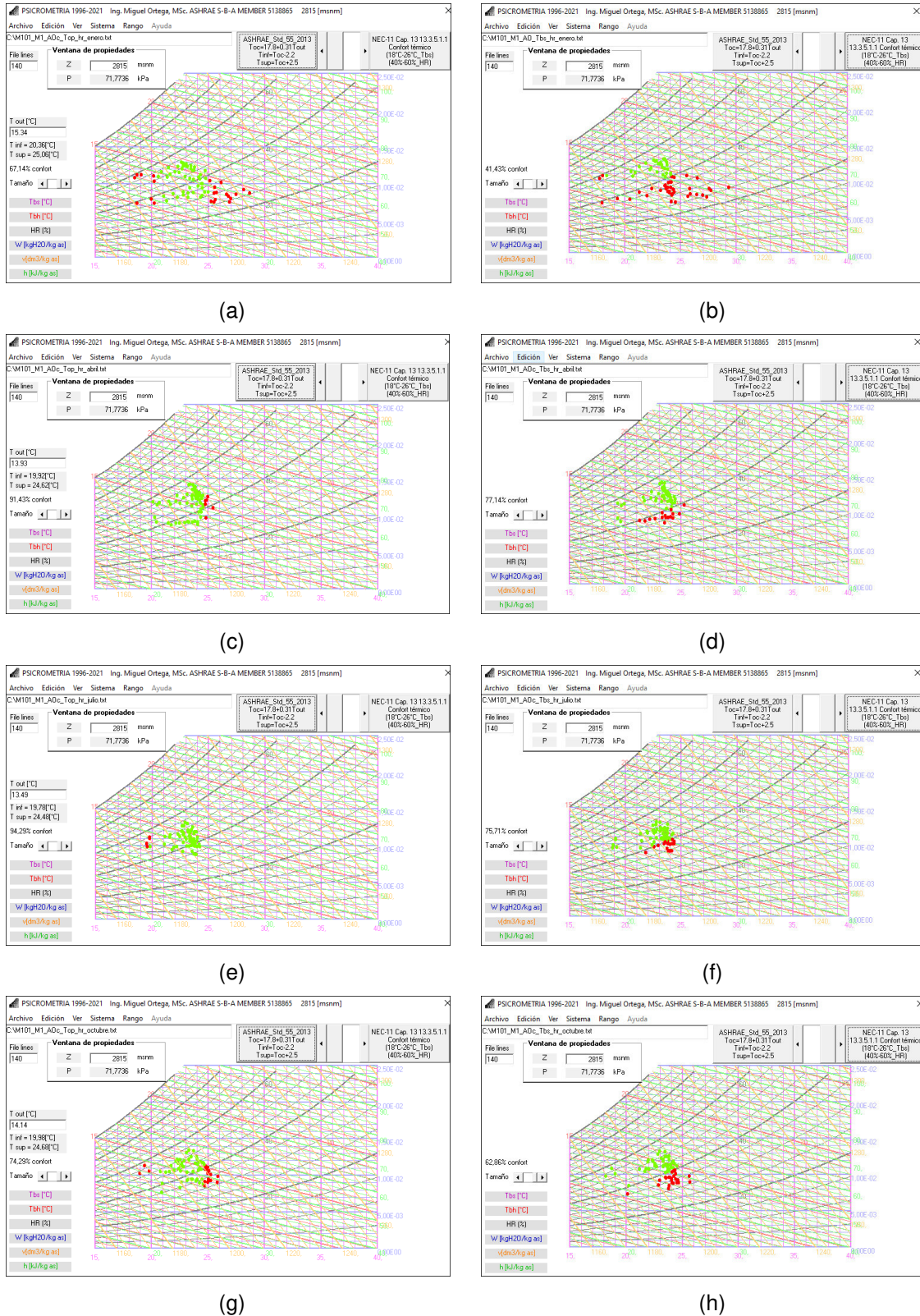
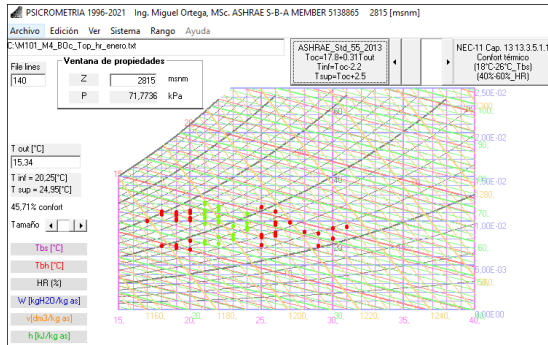


Figura VI.3. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M101, alta ocupación y máxima ventilación M1 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

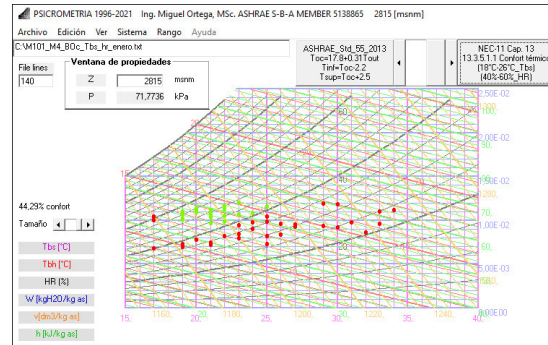
(Fuente: Autores)



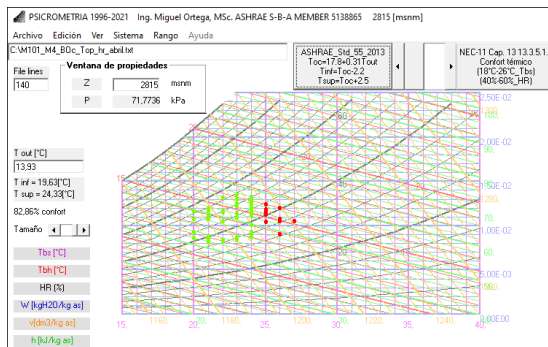
# M101 baja ocupación, baja ventilación (ventanas cerradas, puerta cerrada), M4



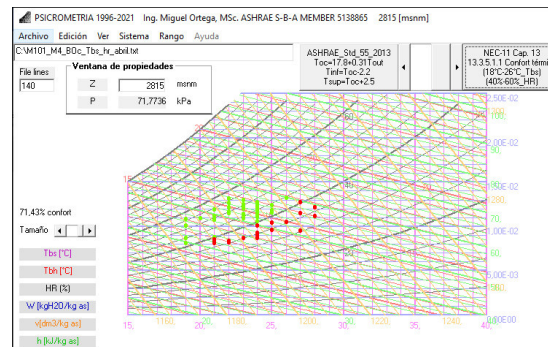
(a)



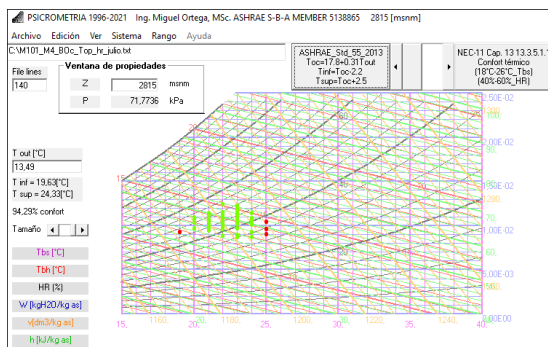
(b)



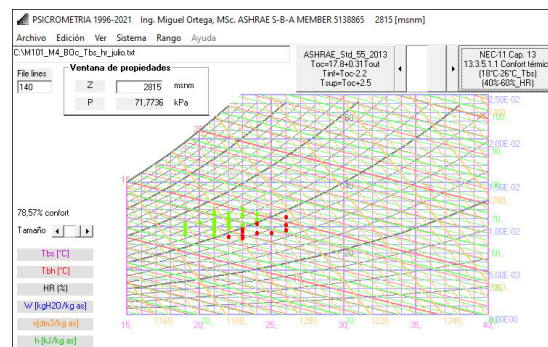
(c)



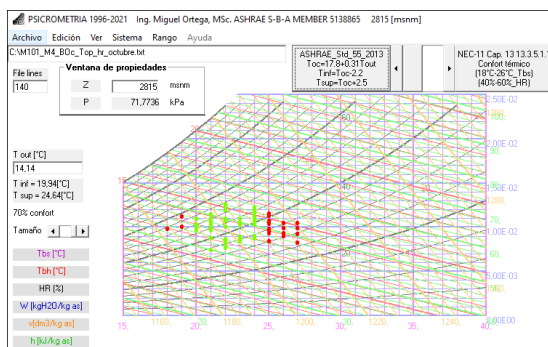
(d)



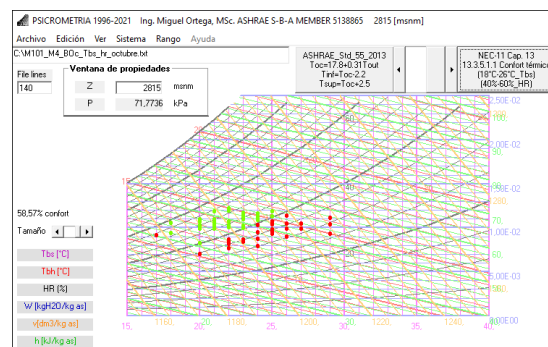
(e)



(f)



(g)

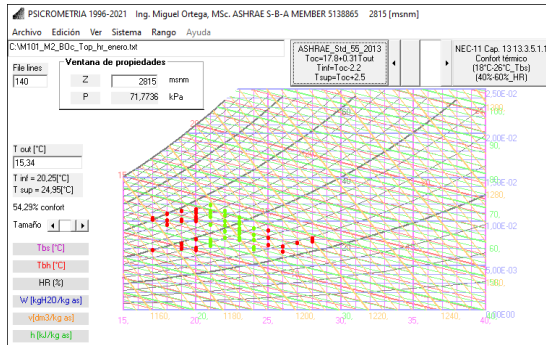


(h)

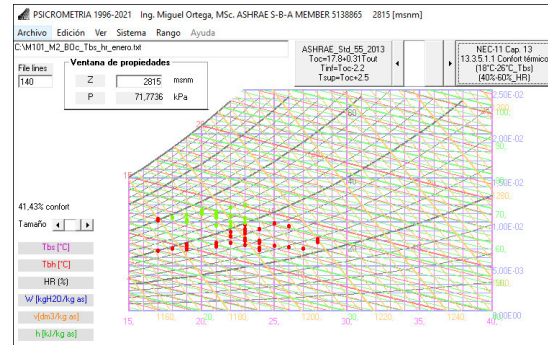
Figura VI.4. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M101, baja ocupación y baja ventilación M4 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

(Fuente: Autores)

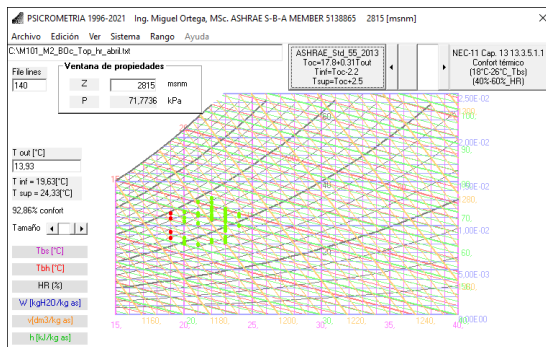
## M101 baja ocupación, media ventilación (ventanas abiertas, puerta cerrada), M2



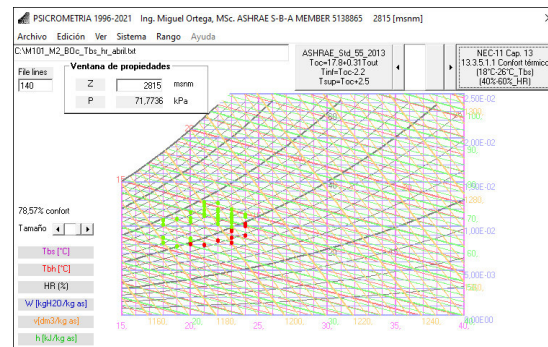
(a)



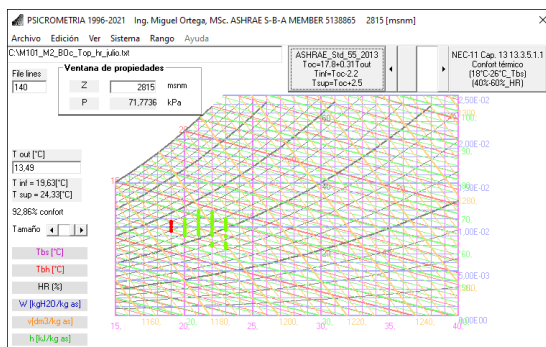
(b)



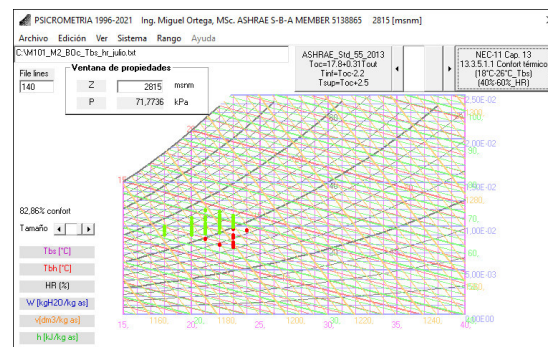
(c)



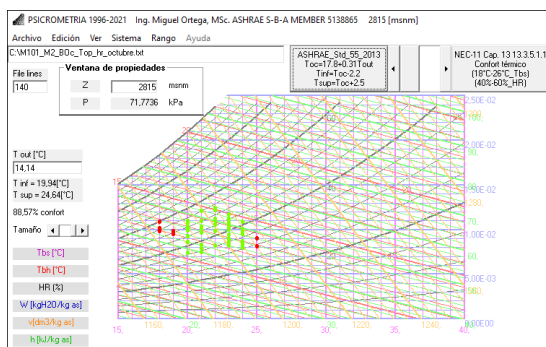
(d)



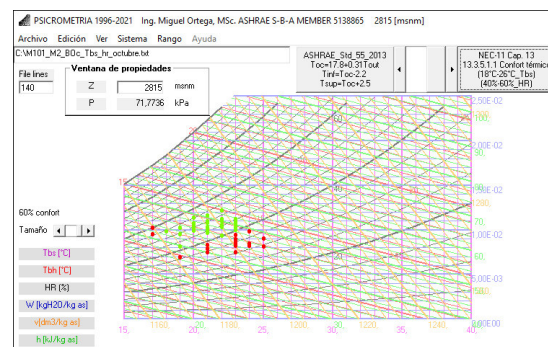
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura VI.5. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M101, baja ocupación y media ventilación M2 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

(Fuente: Autores)

# M101 baja ocupación, máxima ventilación (ventanas abiertas, puerta abierta), M1

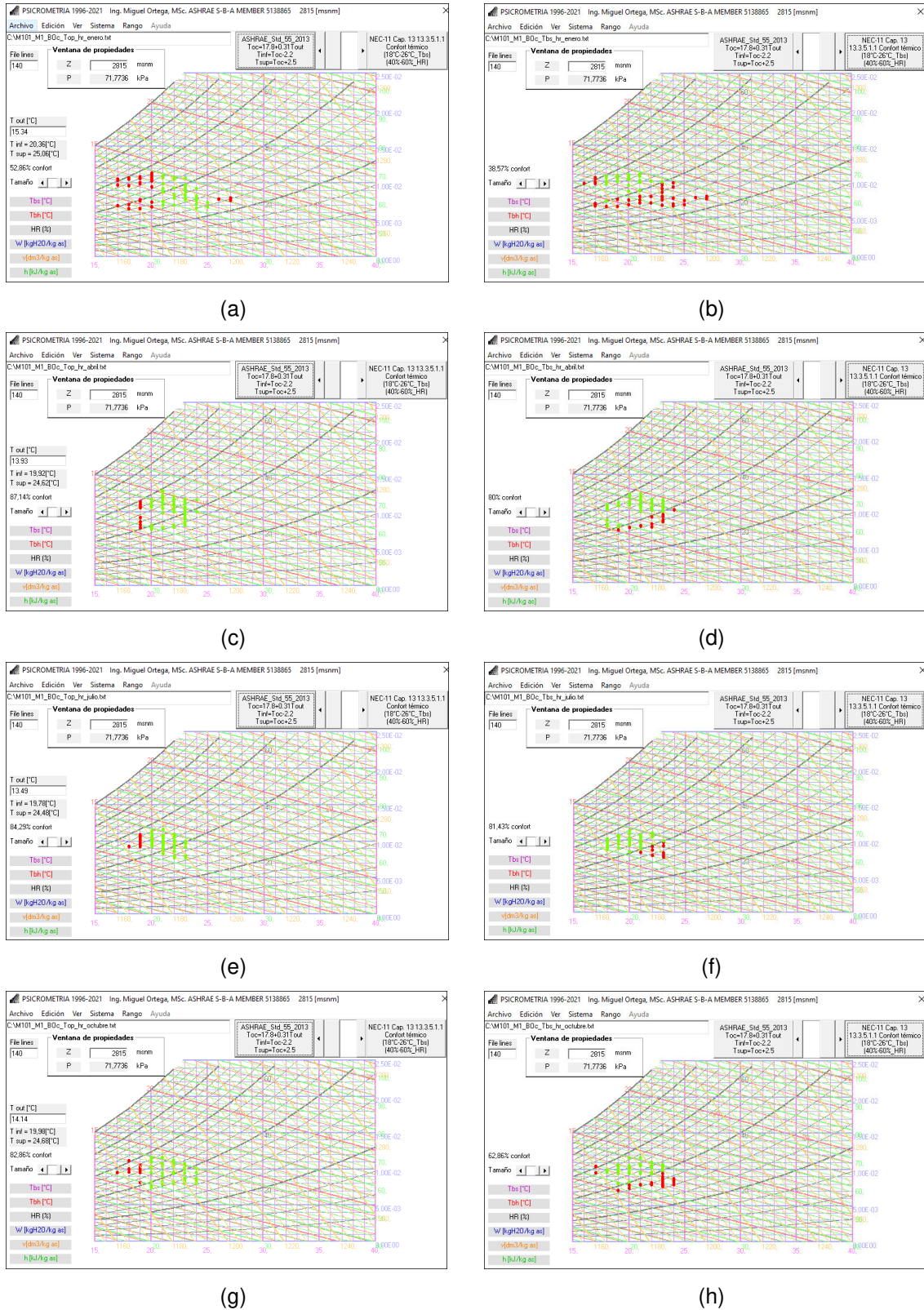


Figura VI.6. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M101, baja ocupación y máxima ventilación M1 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).  
(Fuente: Autores)

## M110 alta ocupación, baja ventilación (ventanas cerradas, puertas cerradas), M4

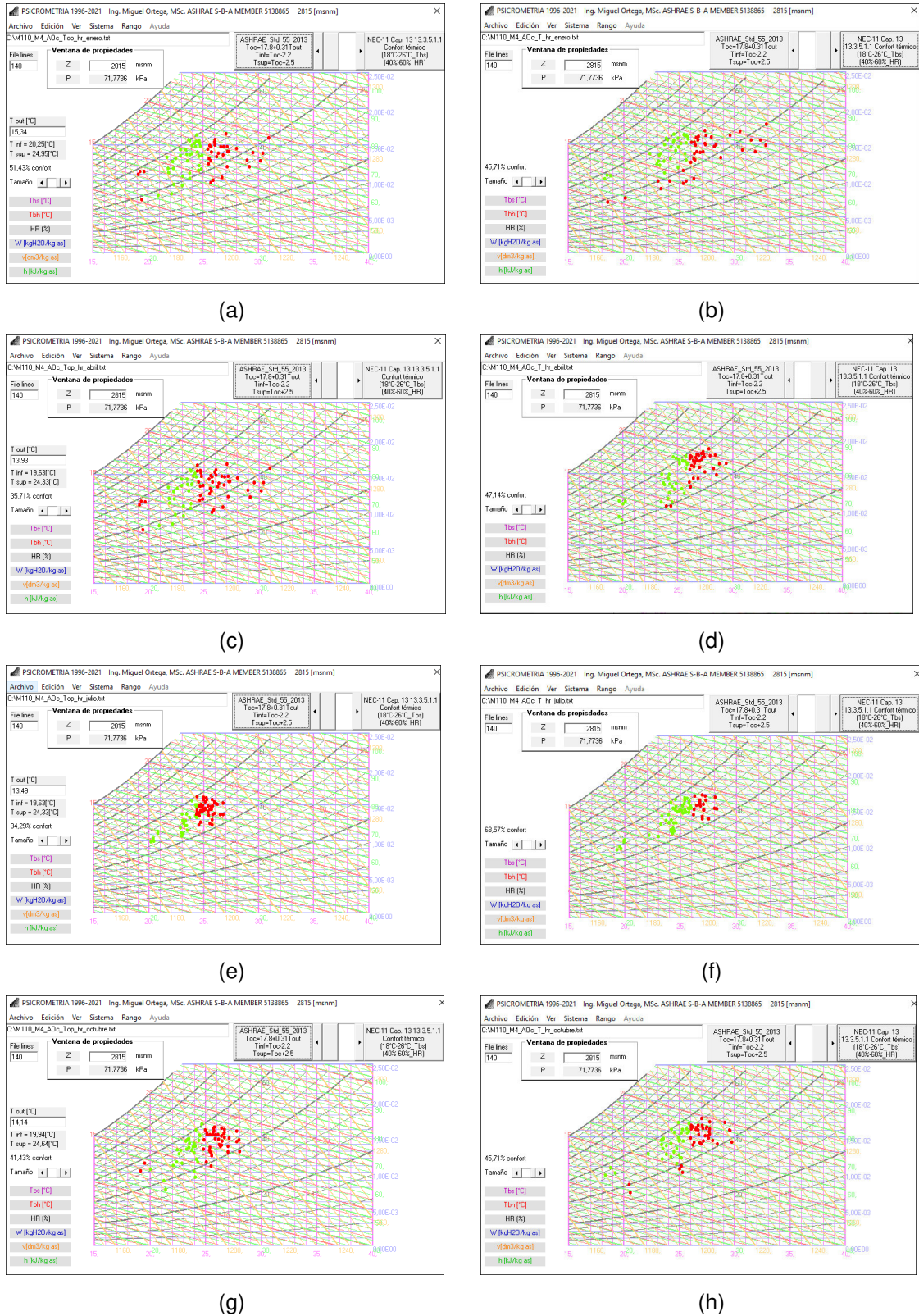


Figura VI.7. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M110, alta ocupación y baja ventilación M4 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).  
(Fuente: Autores)

## M110 alta ocupación, media ventilación (ventanas abiertas, puertas cerradas), M2

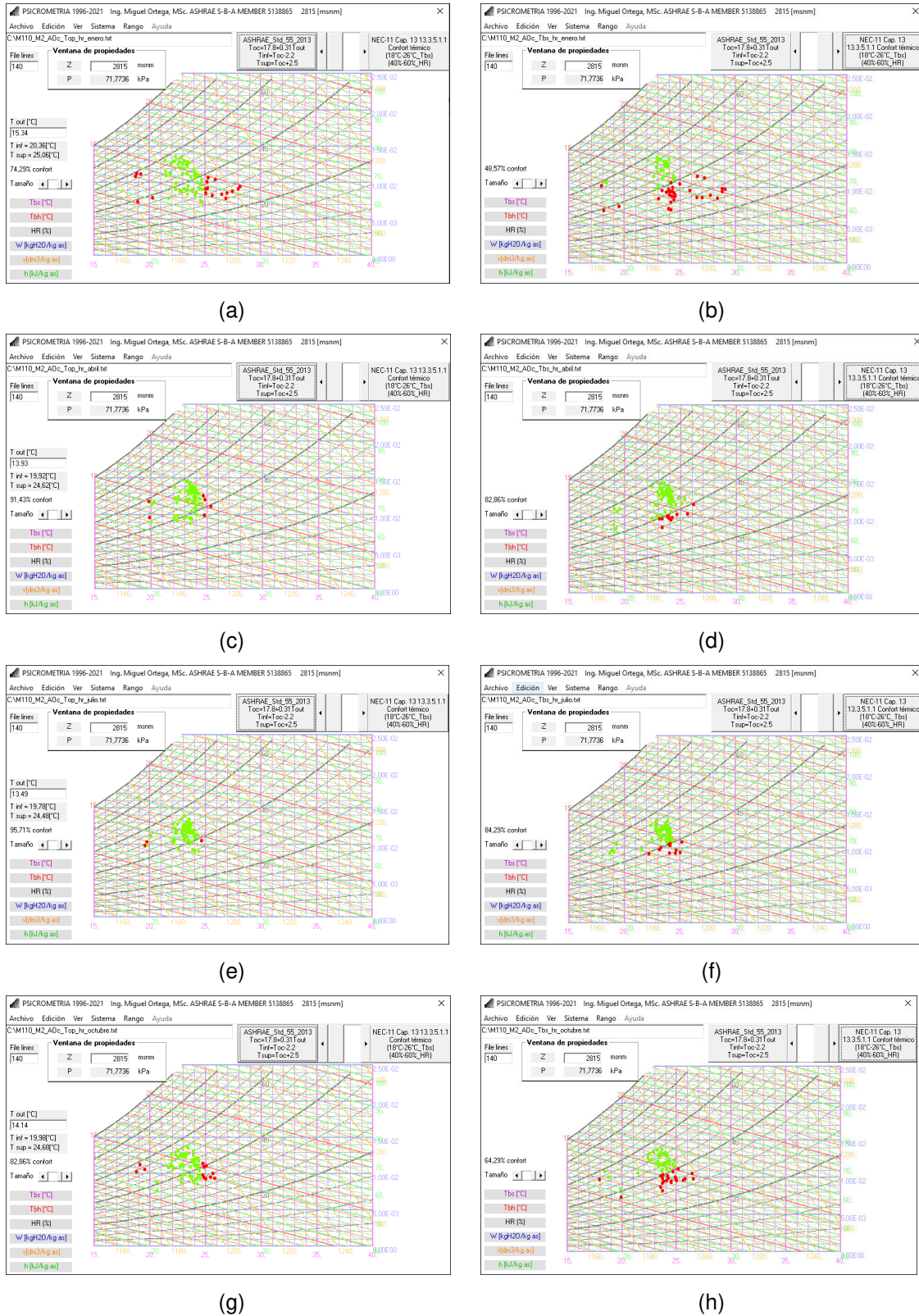


Figura VI.8. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M110, alta ocupación y media ventilación M2 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

(Fuente: Autores)

# M110 alta ocupación, máxima ventilación (ventanas abiertas, puertas abiertas), M1

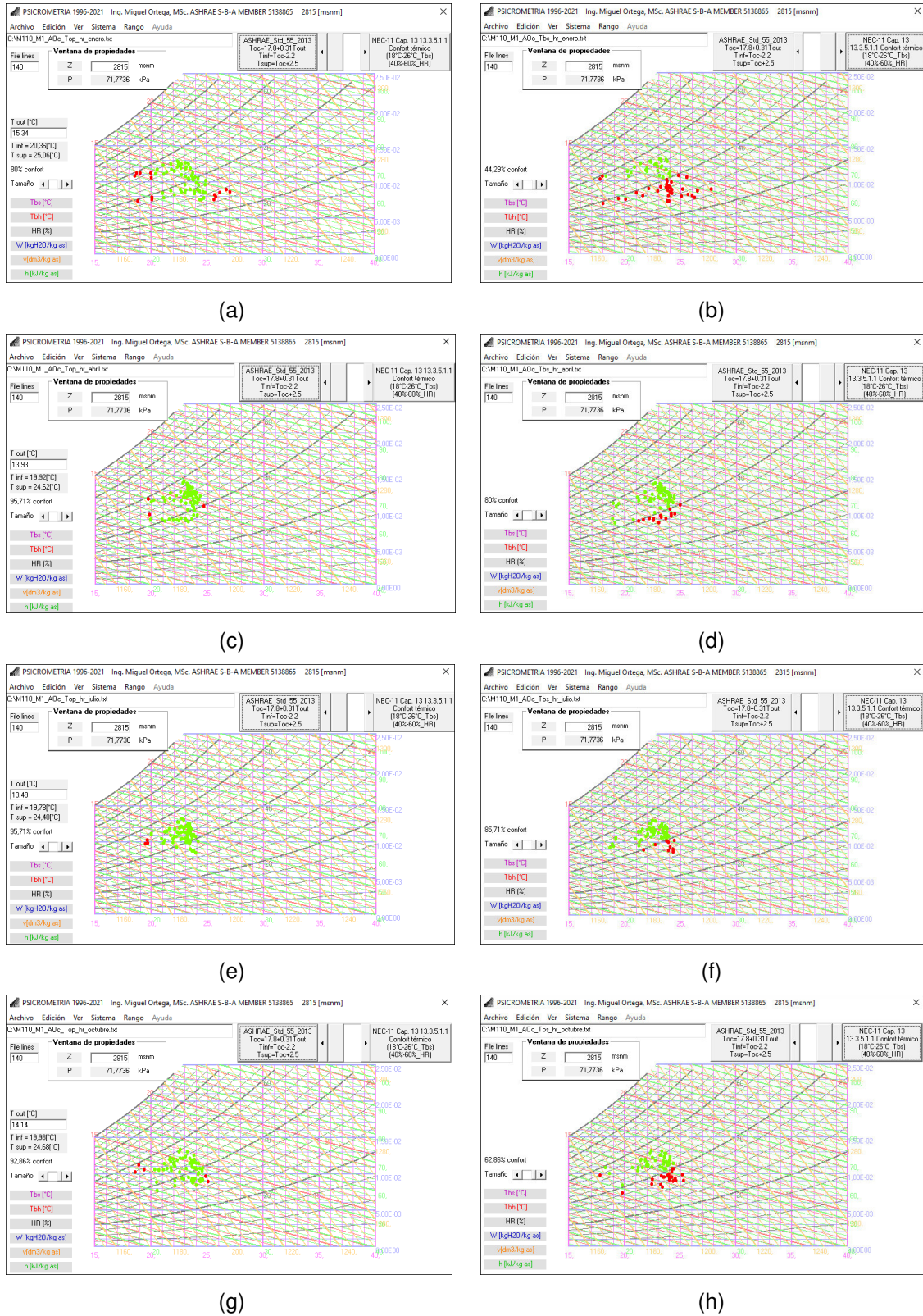


Figura VI.9. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M110, alta ocupación y máxima ventilación M1 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

(Fuente: Autores)

## M110 baja ocupación, mínima ventilación (ventanas cerradas, puertas cerradas), M4

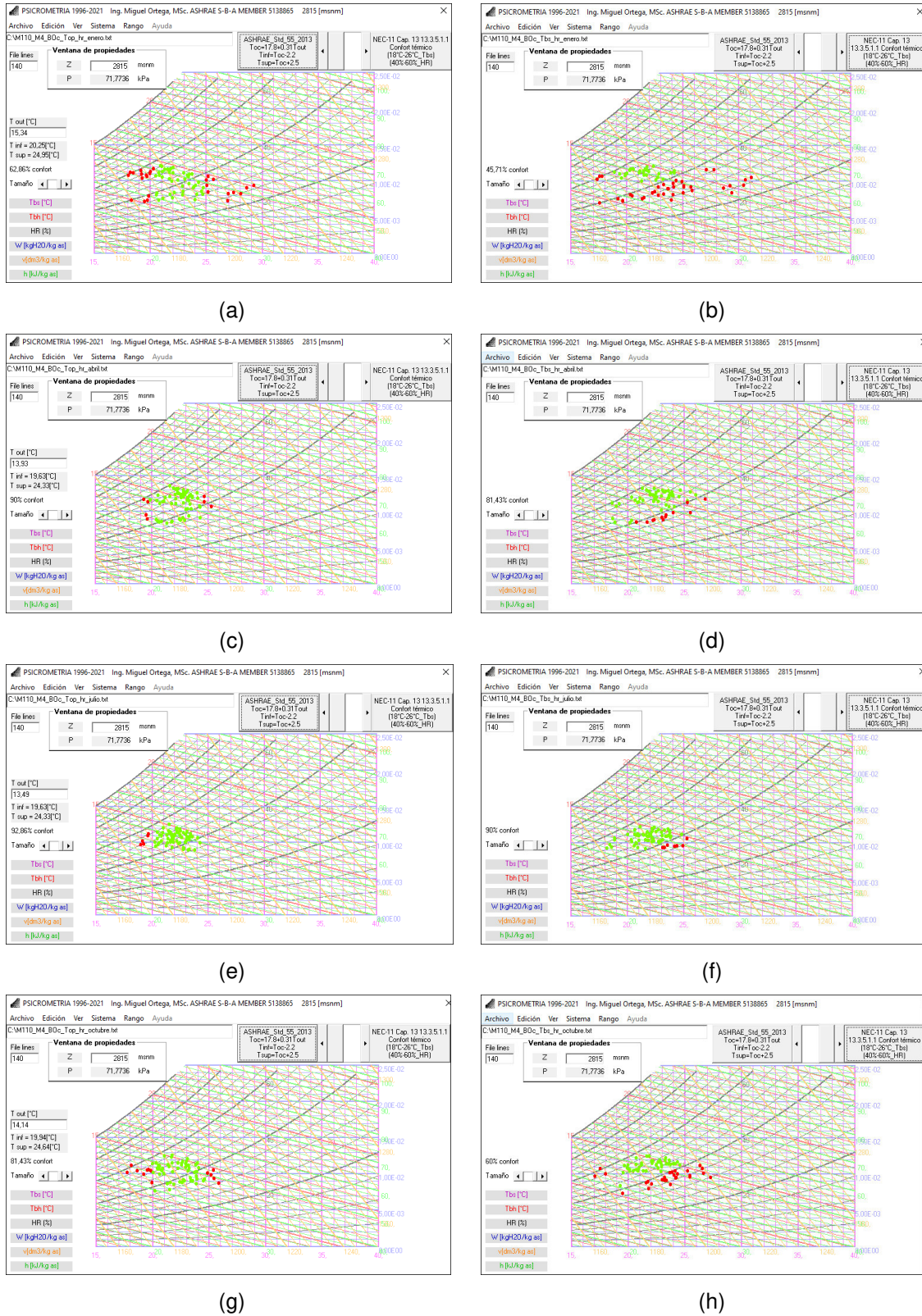


Figura VI.10. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M110, baja ocupación y mínima ventilación M4 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

(Fuente: Autores)

## M110 baja ocupación, media ventilación (ventanas abiertas, puertas cerradas), M2

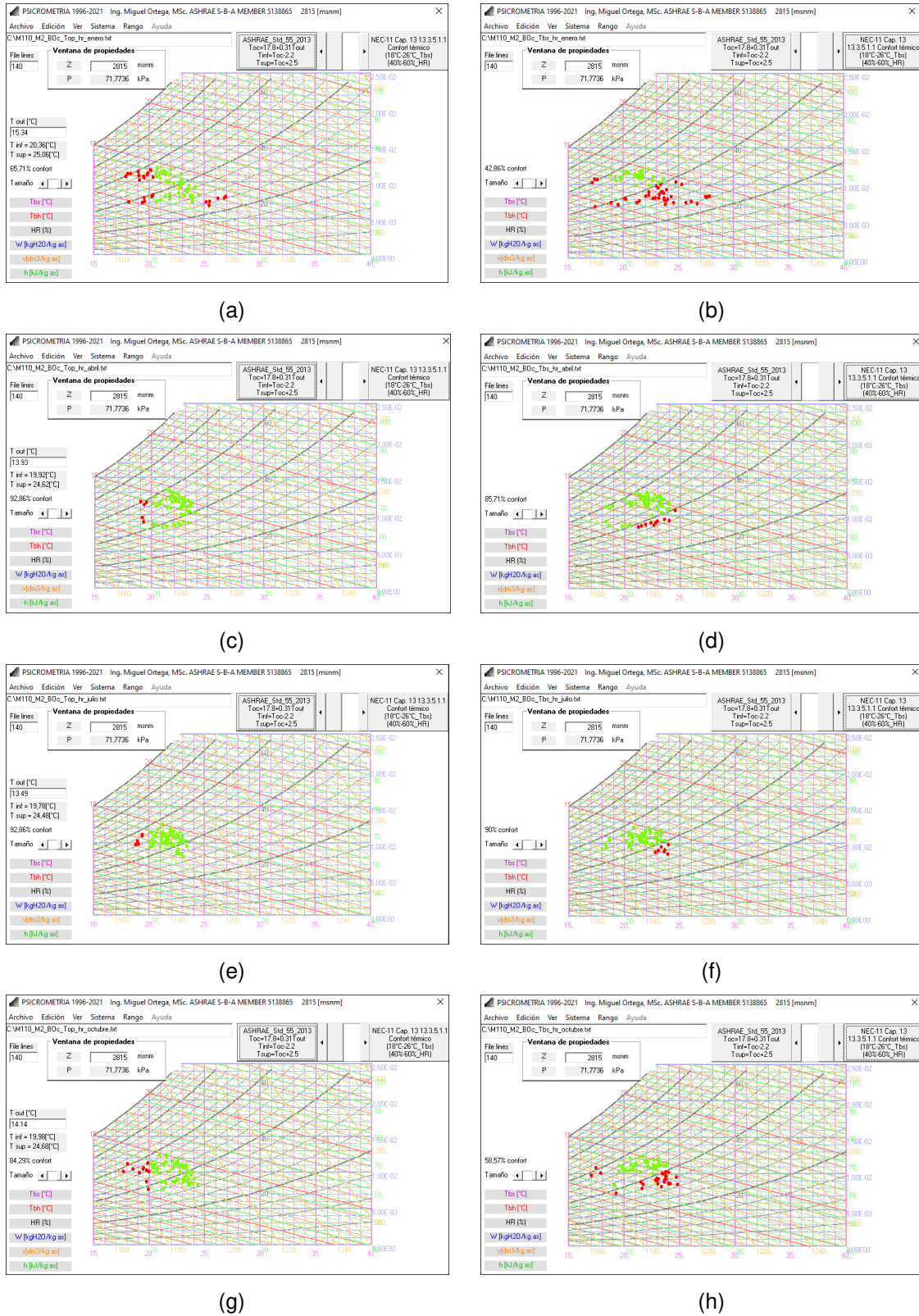


Figura VI.11. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M110, baja ocupación y media ventilación M2 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

(Fuente: Autores)



## M110 baja ocupación, máxima ventilación (ventanas abiertas, puertas abiertas), M1

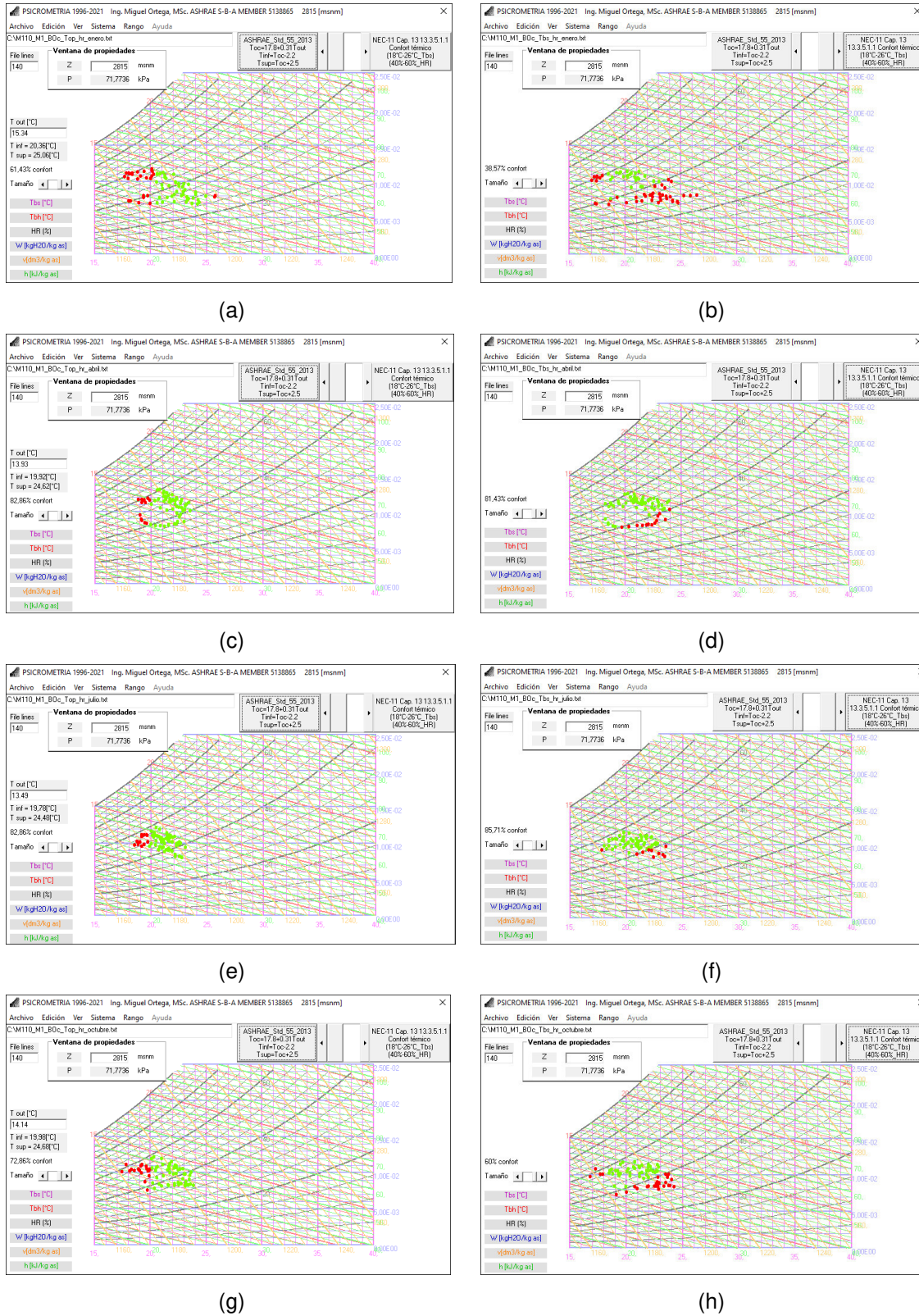


Figura VI.12. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M110, baja ocupación y máxima ventilación M1 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

(Fuente: Autores)

## M201 alta ocupación, mínima ventilación (ventanas cerradas, puertas cerradas), M4

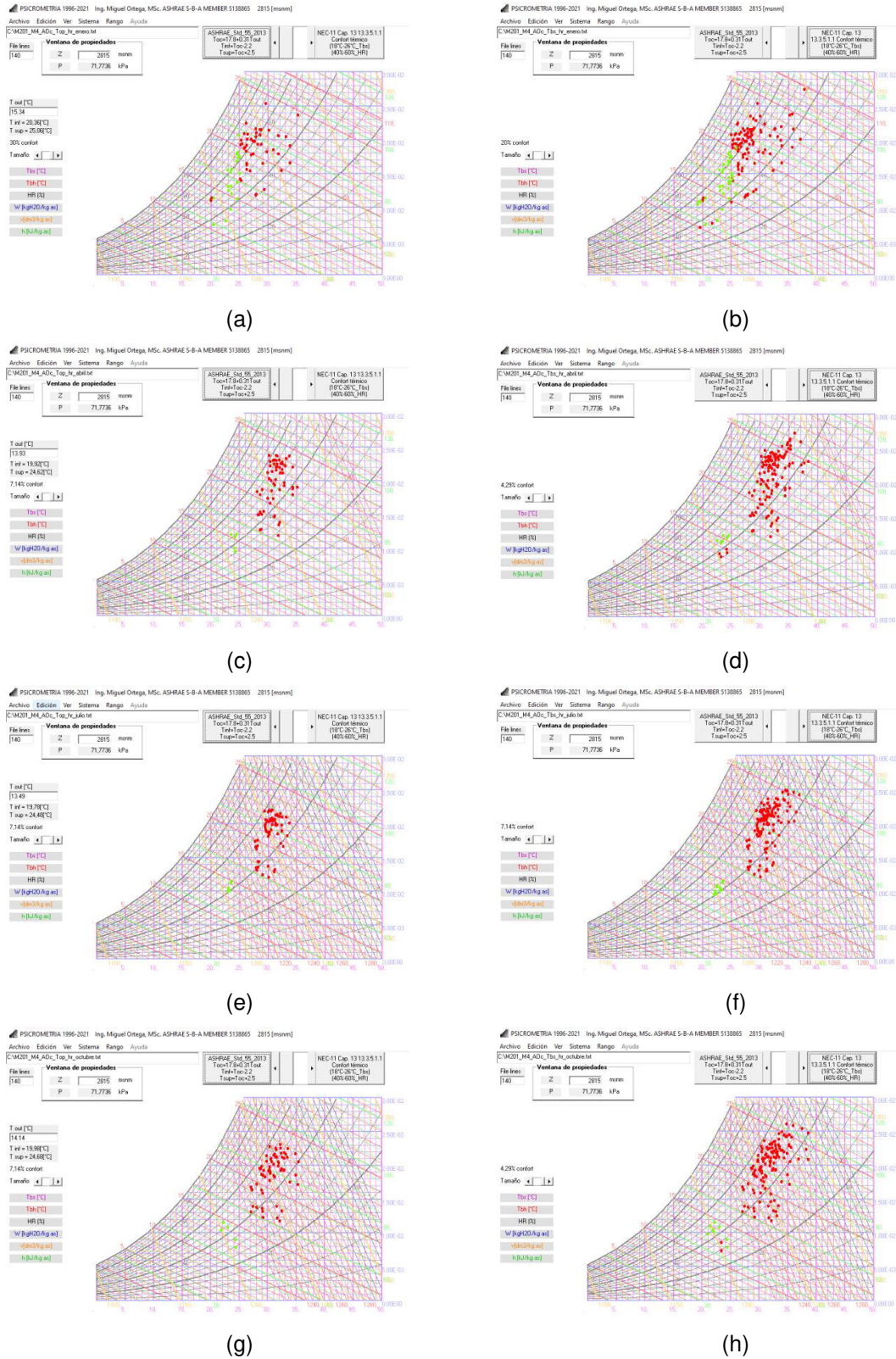


Figura VI.13. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M201, alta ocupación y mínima ventilación M4 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

(Fuente: Autores)

## M201 alta ocupación, media ventilación (ventanas abiertas, puertas cerradas), M2

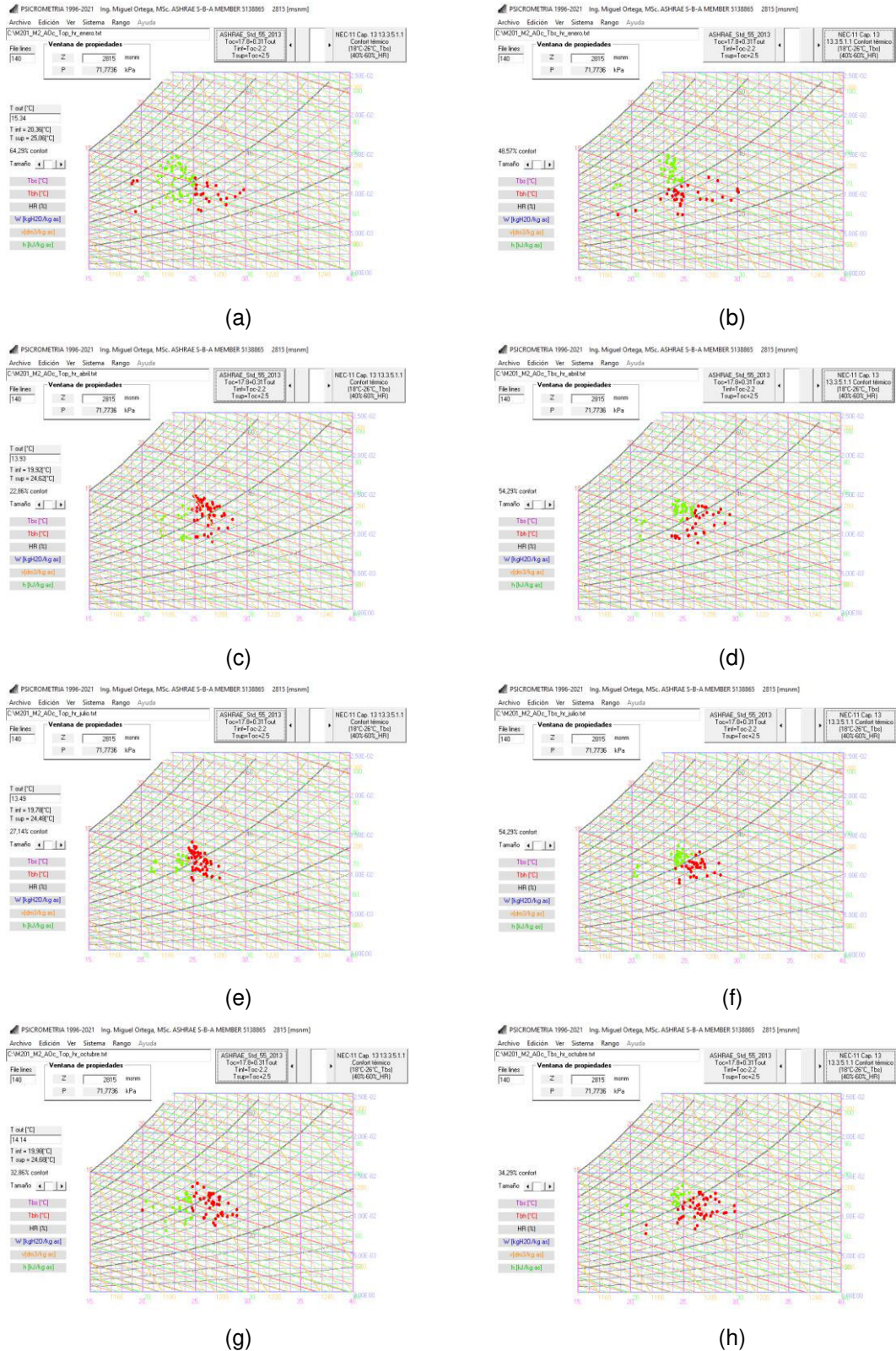


Figura VI.14. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M201, alta ocupación y media ventilación M2 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

(Fuente: Autores)

## M201 alta ocupación, máxima ventilación (ventanas abiertas, puertas abiertas), M1

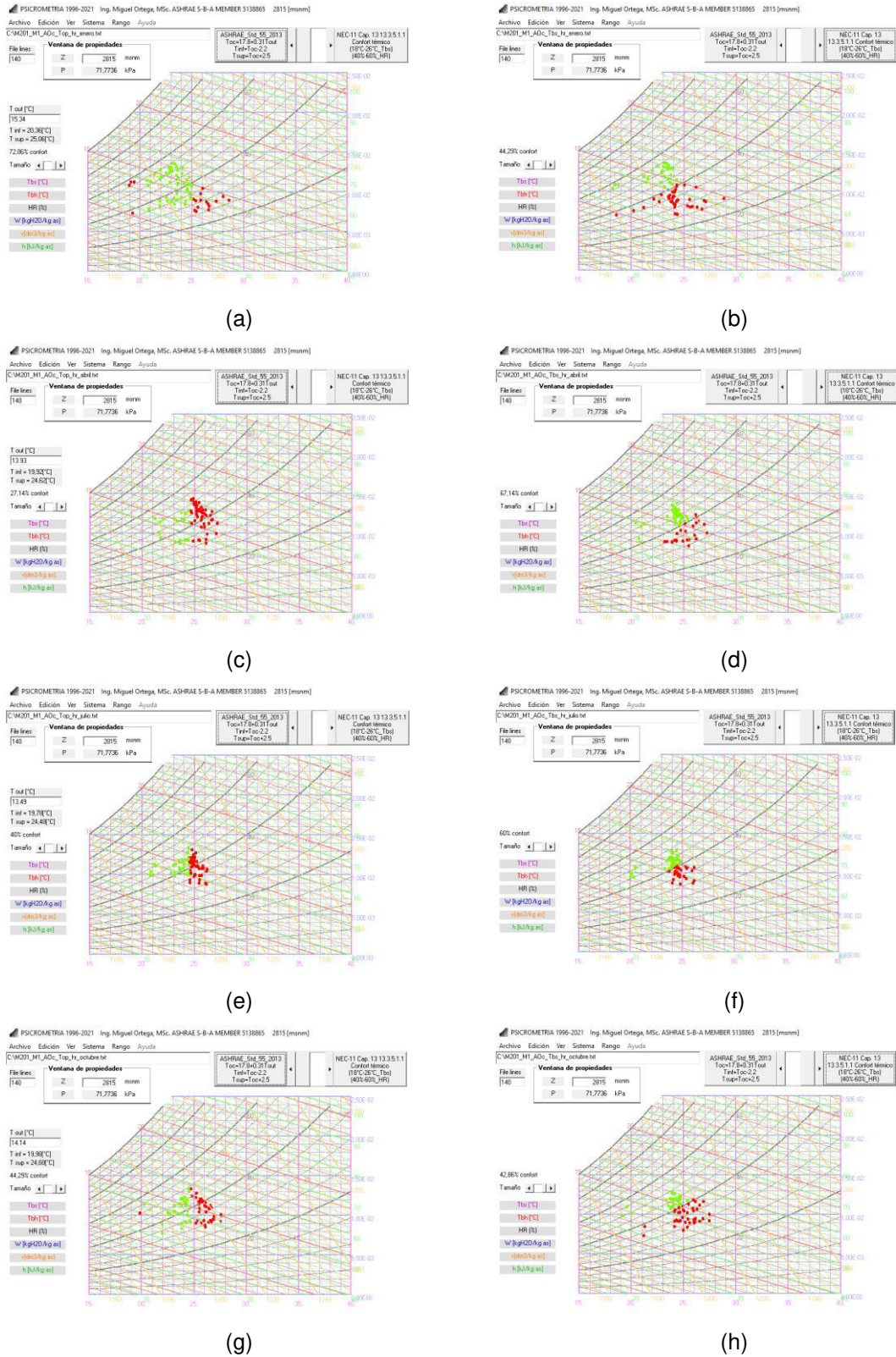


Figura VI.15. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de *ASHRAE* (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M201, alta ocupación y máxima ventilación M1 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).  
(Fuente: Autores)

## M201 baja ocupación, baja ventilación (ventanas cerradas, puertas cerradas), M4

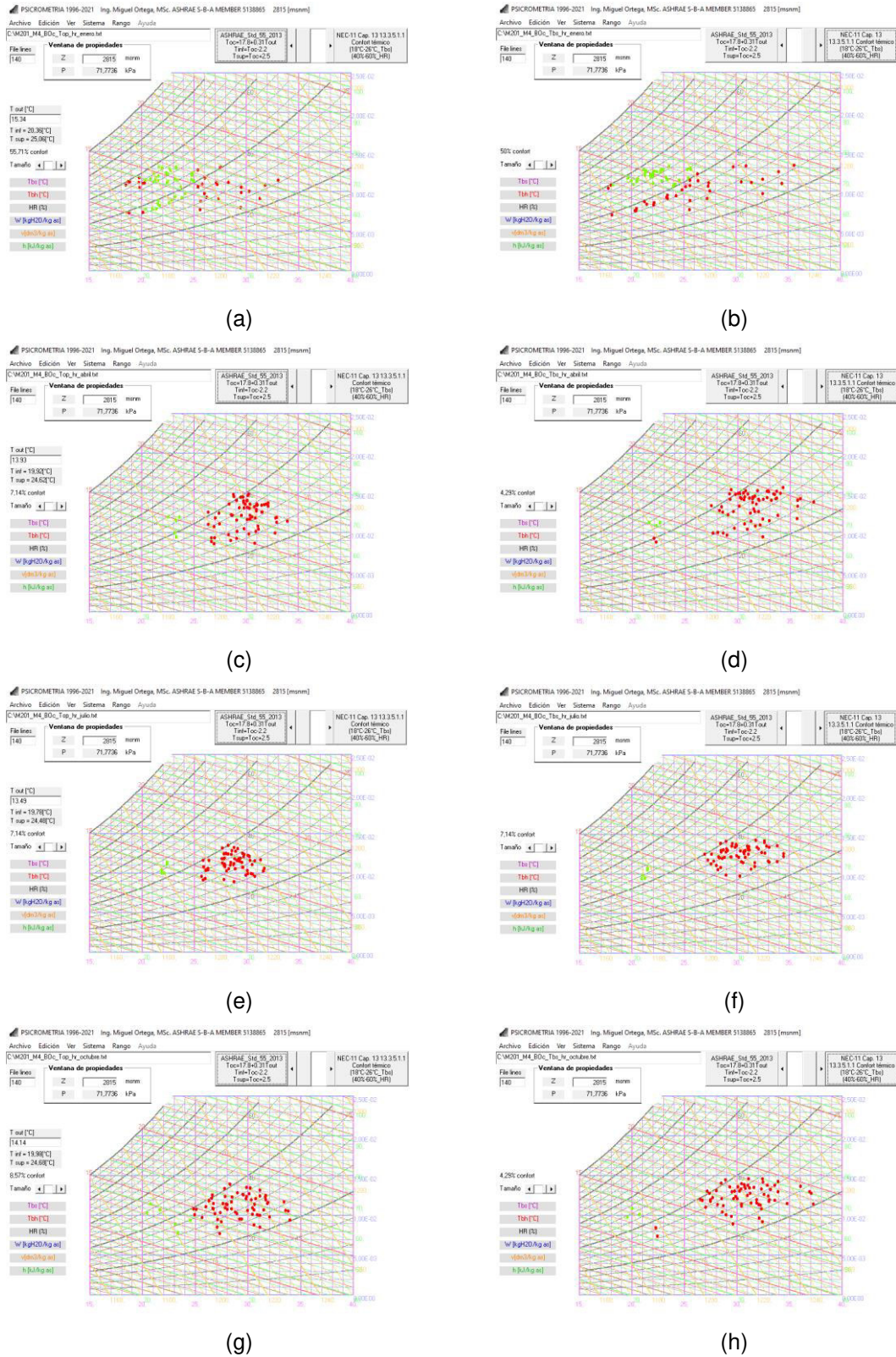


Figura VI.16. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M201, baja ocupación y baja ventilación M4 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

(Fuente: Autores)

## M201 baja ocupación, media ventilación (ventanas abiertas, puertas cerradas), M2

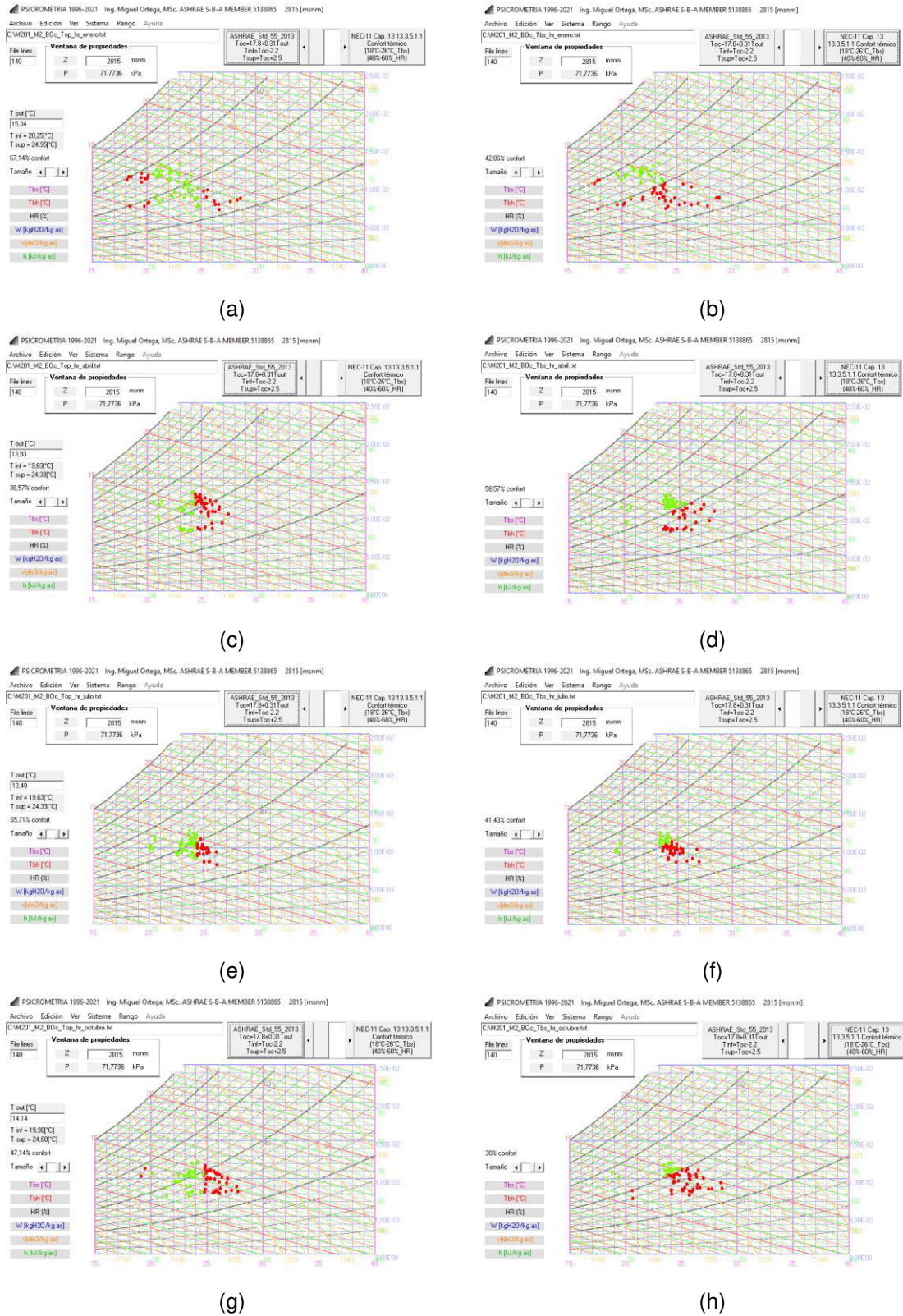


Figura VI.17. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M201, baja ocupación y media ventilación M2 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

(Fuente: Autores)

## M201 baja ocupación, máxima ventilación (ventanas abiertas, puertas abiertas), M1

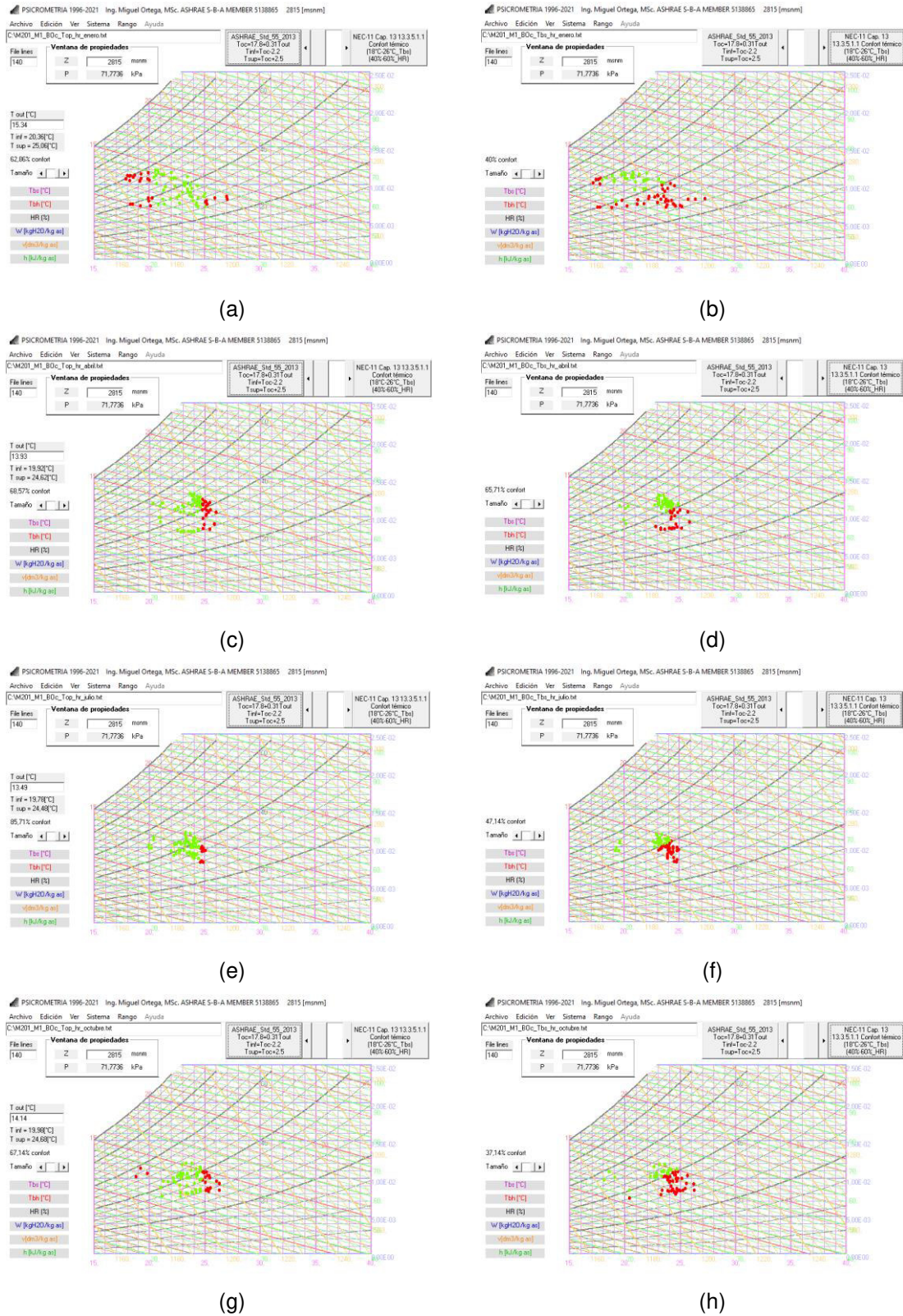
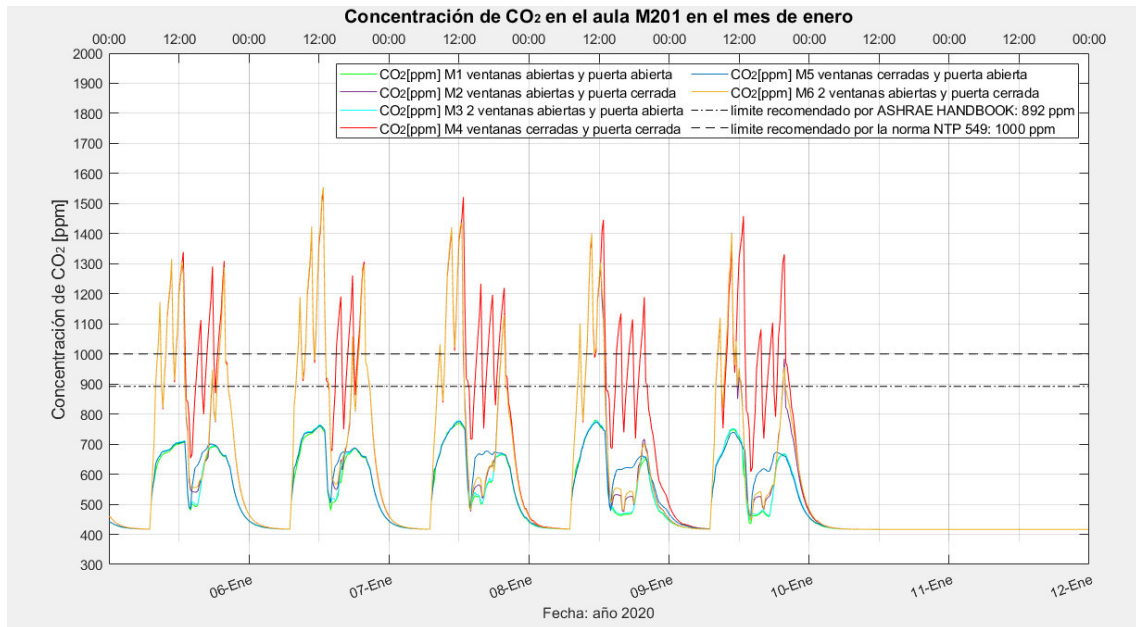


Figura VI.18. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M201, baja ocupación y máxima ventilación M1 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).  
(Fuente: Autores)

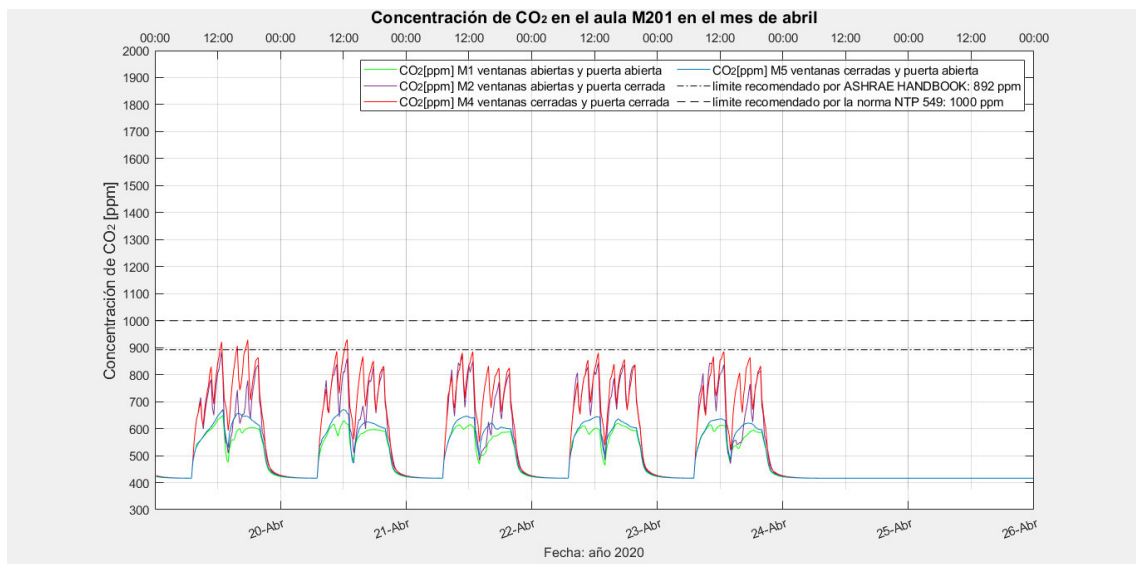
## ANEXO VII. Gráficas de CO<sub>2</sub>

Resultados de concentración de CO<sub>2</sub> en el aula M201, M101 y M110 en baja ocupación

Aula 201

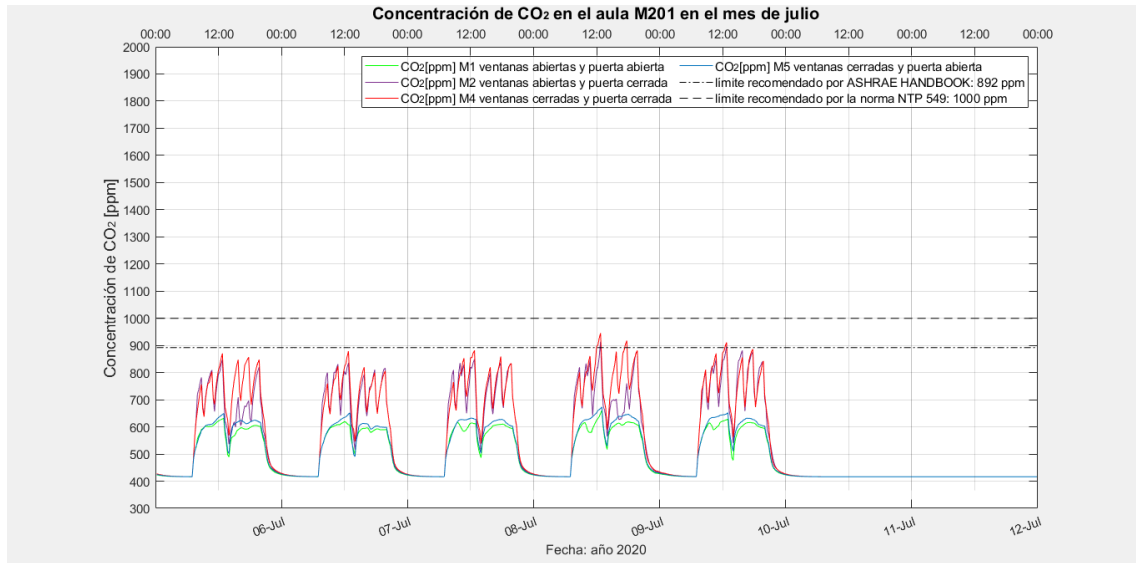


(a)

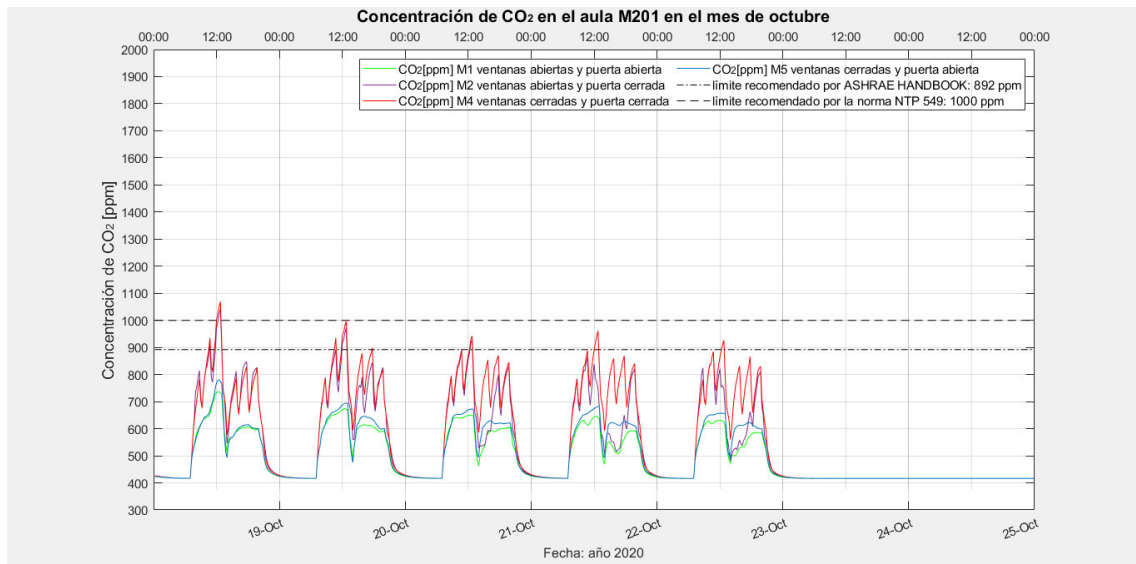


(b)





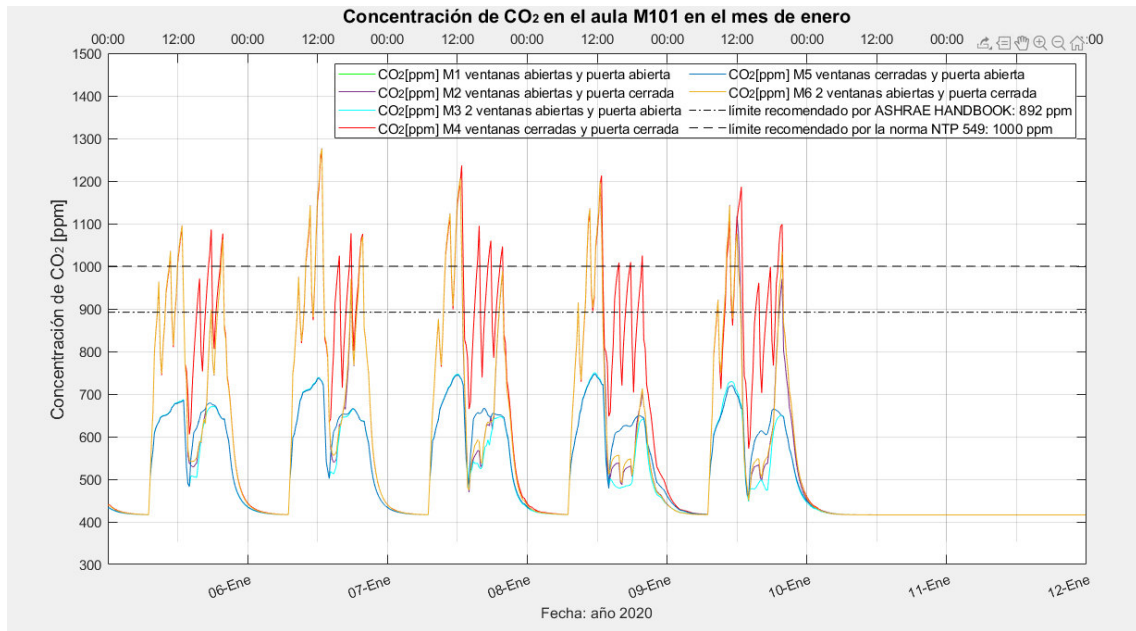
(c)



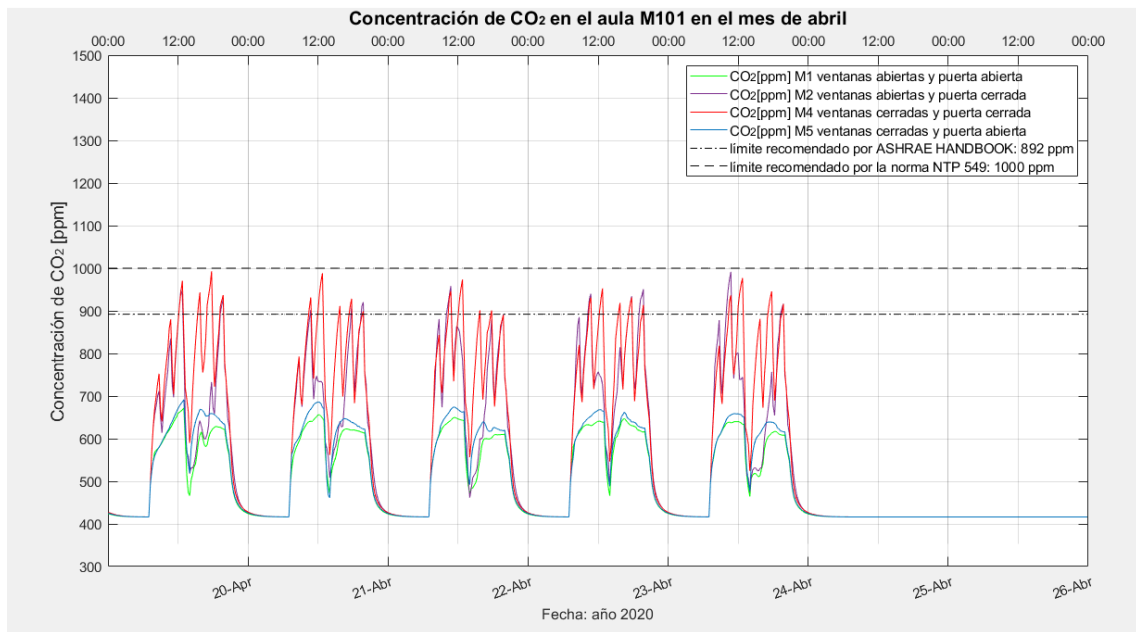
(d)

Figura VII.1. Concentración de CO<sub>2</sub> en los diferentes meses de enero (a), febrero (b), julio (c) y octubre (d) del año 2020 en el aula M201 para baja ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4, M5).  
(Fuente: Autores)

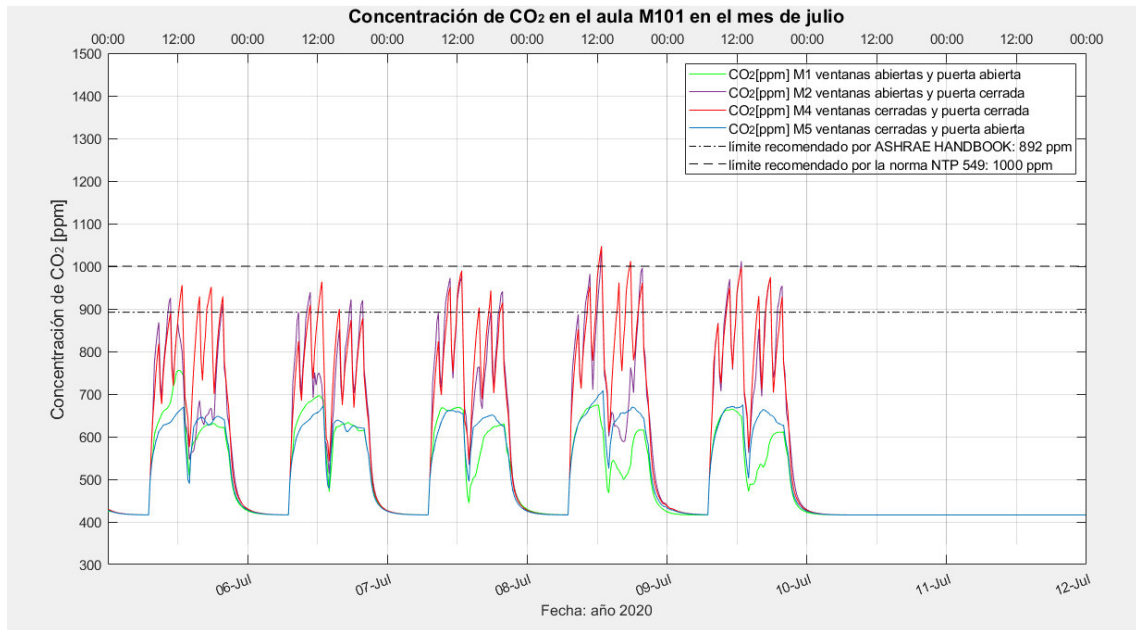
# Aula M101



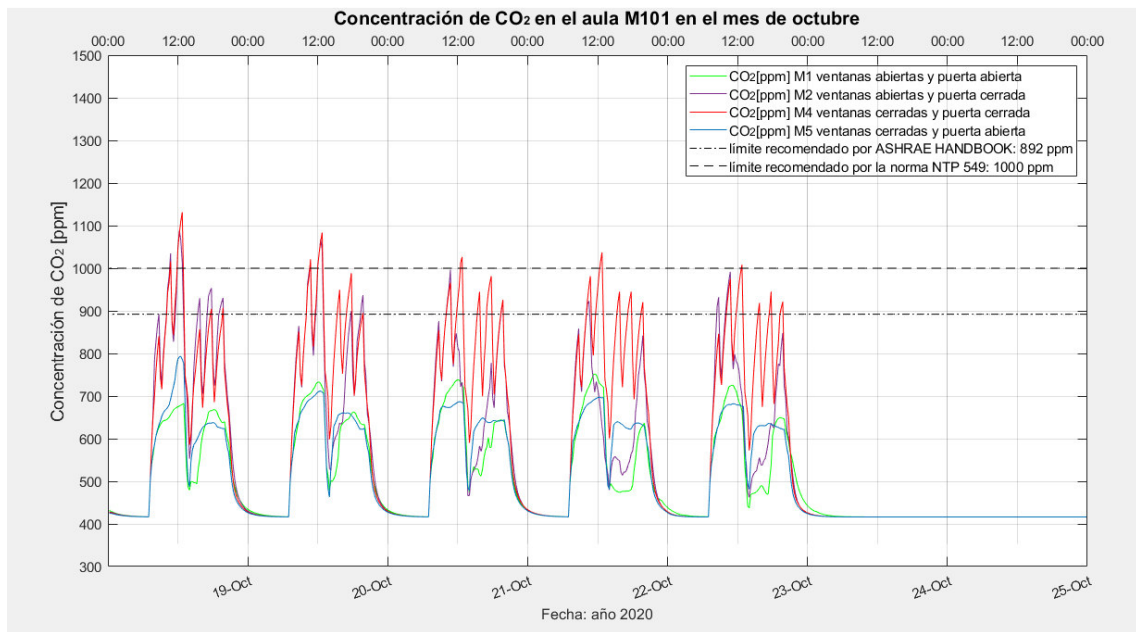
(a)



(b)



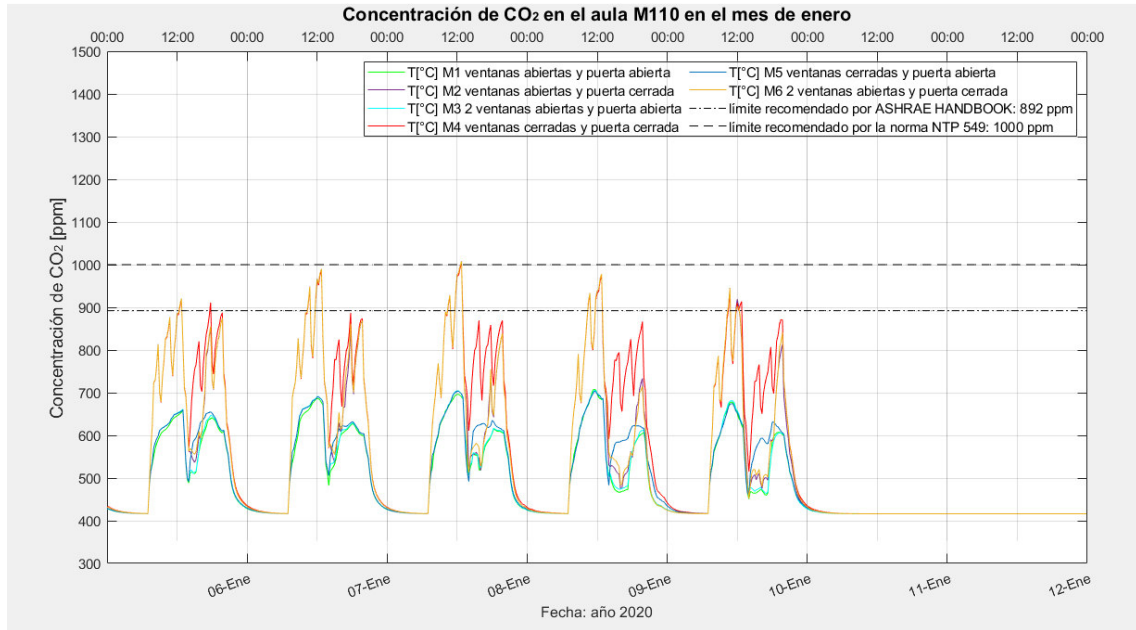
(c)



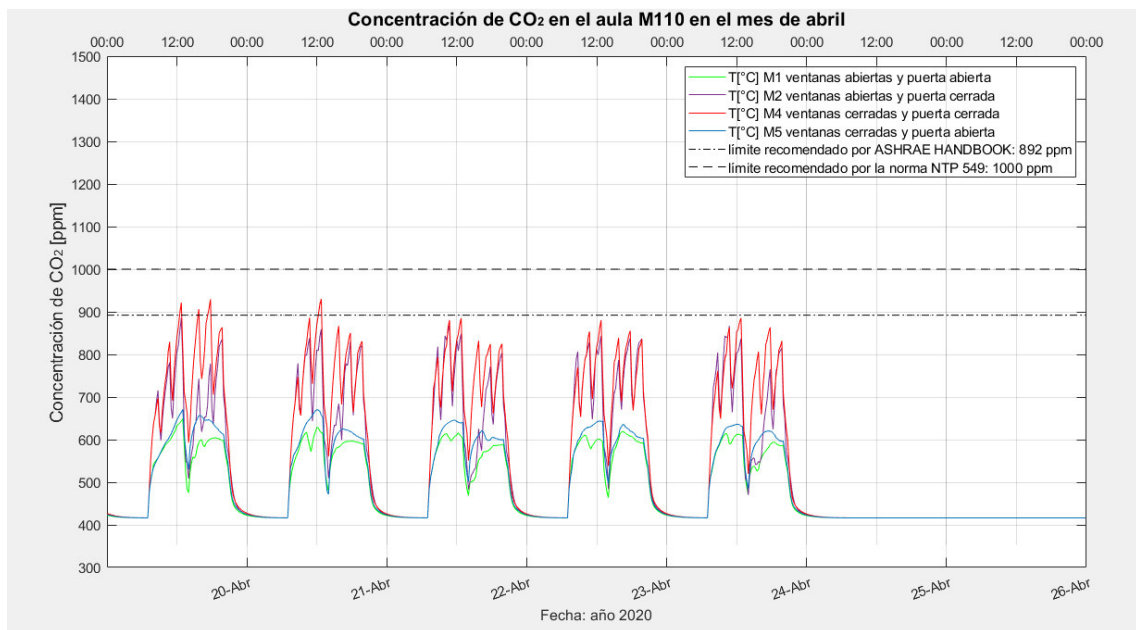
(d)

Figura VII.2. Concentración de CO<sub>2</sub> en los diferentes meses de enero (a), febrero (b), julio (c) y octubre (d) del año 2020 en el aula M101 para baja ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4, M5).  
(Fuente: Autores)

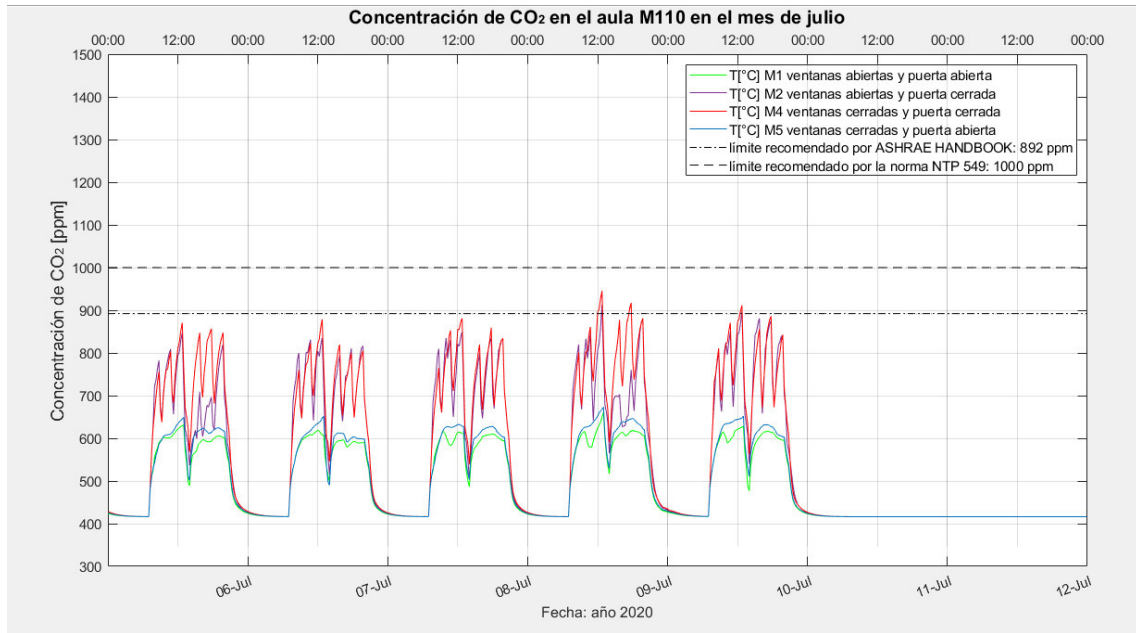
# Aula M110



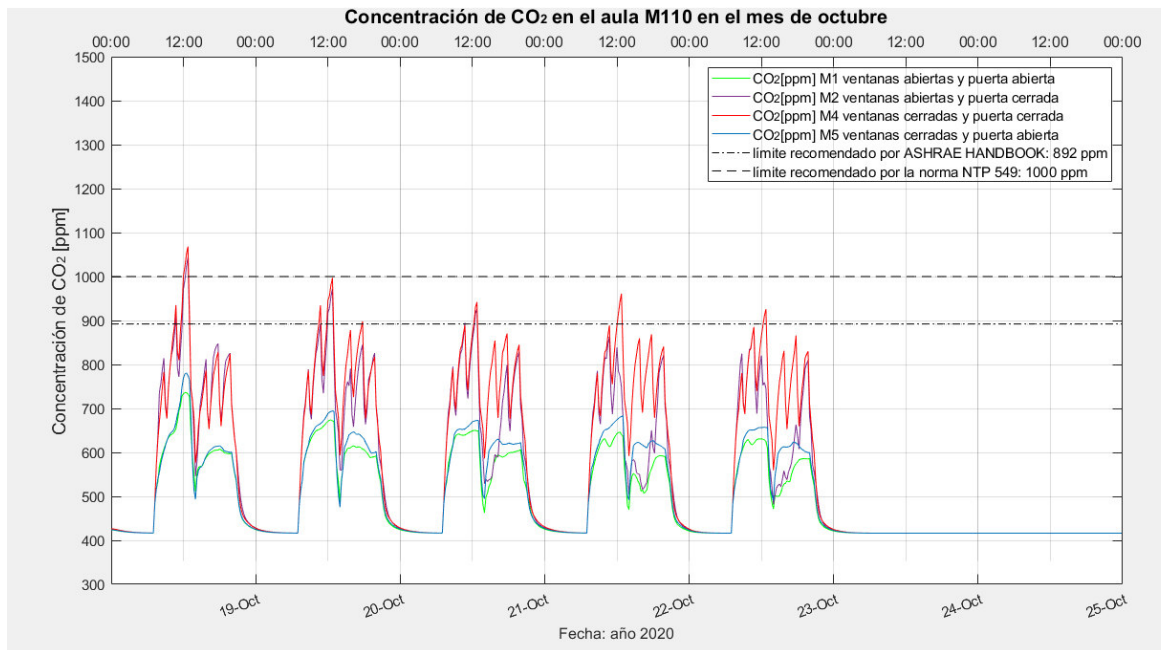
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura VII.3. Concentración de CO<sub>2</sub> en los diferentes meses de enero (a), febrero (b), julio (c) y octubre (d) del año 2020 en el aula M110 para baja ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4, M5).  
(Fuente: Autores)

## ANEXO VIII. Funcionamiento del software *DesignBuilder*

### Interfaz de *DesignBuilder*

El programa cuenta con una interfaz dinámica, en la parte superior se encuentra la barra de opciones que contiene tareas específicas de *DesignBuilder*; la pantalla principal se divide en 3 paneles los cuales se detallan a continuación:

- **Panel de navegación:** Se ubica en la parte izquierda y sirve para navegar entre los diferentes niveles y pisos del edificio.
- **Panel de edición:** Se ubica en el centro y sirve para crear y modificar el modelo, en la parte superior e inferior se encuentran algunas pestañas que sirven para la edición y configuración del modelo.
- **Panel de información:** Se ubica en la parte derecha y contiene información y ayuda para la creación y edición del modelo.
- **Barra de herramientas:** Se ubica en la parte superior de la pantalla y contiene herramientas para el desarrollo de tareas específicas para editar el modelo.

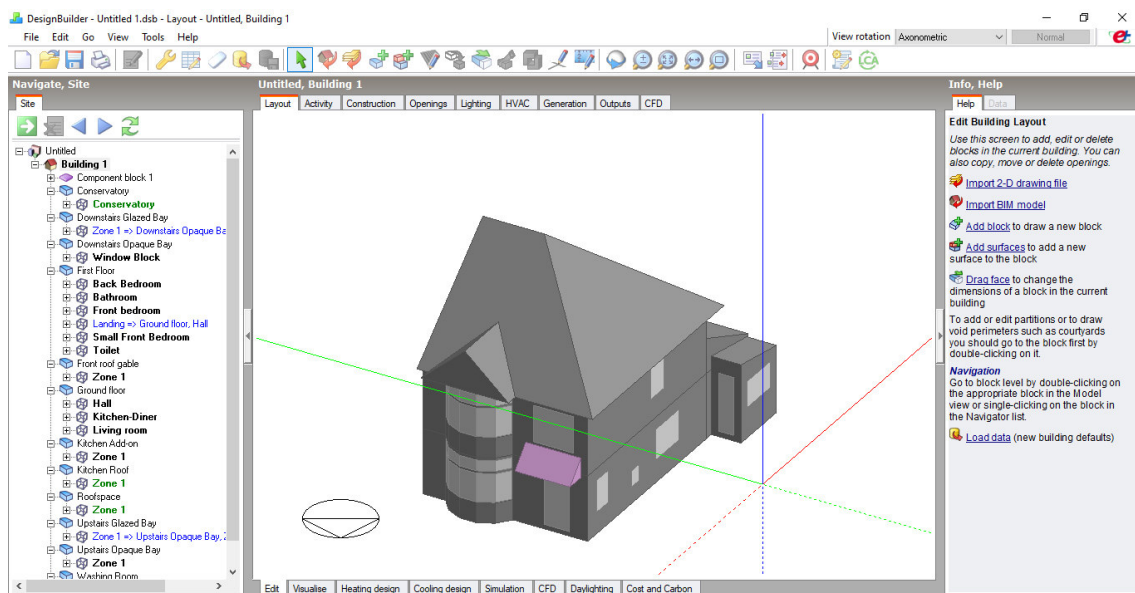


Figura VIII. 1. Interfaz del programa *DesignBuilder*.  
(Fuente: Autores)

### Opciones de edición

Las opciones de edición se encuentran en un conjunto de pestañas que se ubican en el panel de edición; en cada una de las pestañas se debe colocar información correspondiente a la edición del modelo. Las pestañas de edición son las siguientes:

- **Pestaña de capa:** Esta pestaña se debe seleccionar para mostrar la pantalla de edición del modelo; para construir un modelo se debe seleccionar un bloque de edificio en la barra de herramientas y la geometría se modifica con las opciones de la barra de herramientas.
- **Pestaña de actividad:** En esta pestaña se especifican los datos y horarios de ocupación (la tasa metabólica y generación de CO<sub>2</sub> por persona, aislamiento por vestimenta), los datos de la actividad que se realiza en el lugar, los datos y horarios de funcionamiento de computadores, los datos de funcionamiento de otros equipos.
- **Pestaña de construcción:** En esta pestaña se deben especificar los materiales de construcción del edificio; existen zonas específicas donde se puede colocar el tipo de construcción como son los techos, paredes, suelos, particiones, etc. También se puede ingresar datos de superficies adyacentes y su condición térmica e infiltración del edificio, etc. Si se colocan las plantillas de los materiales en el nivel superior de edificio estas se heredan a los lugares de menor jerarquía como son los bloques y zonas.

El software *DesignBuilder* contiene algunos tipos de construcciones que se localizan en diferentes lugares del edificio, las construcciones más importantes son los muros exteriores, muros enterrados, cubiertas planas, muros semi-expuestos, techos semi-expuestos, suelos semi-expuestos, suelos sobre terreno, suelos exteriores, suelos interiores, subsuperficies, etc. Cada uno de los diferentes tipos de construcción permiten ser configurados de acuerdo a la necesidad del usuario. En la gráfica se muestra la disposición de las construcciones mencionadas.

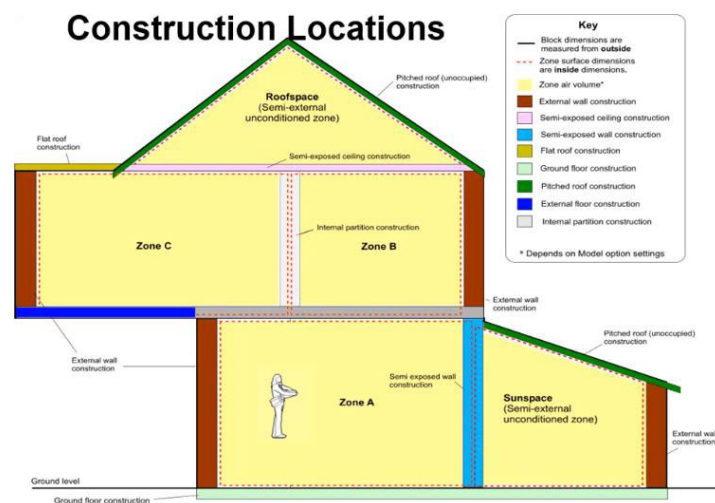


Figura VIII. 2. Configuraciones de suelos, paredes y techos de la construcción.  
(Fuente: [36])

El software *DesignBuilder* contiene una librería de plantillas para la construcción de muros, techos, paredes y subsuperficies (paredes, suelos y techos de otro material), si se necesita crear una construcción específica esta se puede crear en una nueva plantilla, para realizar esto se debe copiar una plantilla de construcción, se edita y se modifica.

- **Pestaña de aberturas:** En esta pestaña se debe ingresar información sobre el material de las aperturas, las dimensiones, el tamaño de las separaciones entre aperturas, tamaño de marcos, horarios de funcionamiento, sombreado de ventanas con la posibilidad de colocar persianas e incluso la configuración de la apertura de la ventana, puerta y su dirección, etc.
- **Pestaña de iluminación:** En esta pestaña se debe ingresar la información sobre la iluminación del edificio y los diferentes lugares que este contiene. La pestaña contiene las siguientes opciones.
- **Pestaña de HVAC:** En esta pestaña se debe colocar la configuración de la ventilación y los sistemas de calefacción, refrigeración y aire acondicionado. La pestaña contiene las siguientes opciones. En la simulación de las dependencias de la EPN se activa la ventilación natural que aparece en este apartado. El software *DesignBuilder* utiliza un método de ventilación natural donde se utilizan nodos para el transporte de flujo de aire entre las diferentes zonas. *DesignBuilder* coloca algunas opciones en color verde, esto quiere decir que esa opción está disponible solamente para sistemas de calentamiento y enfriamiento. El programa permite especificar la distribución de temperatura; se puede colocar la distribución de la temperatura del aire en una zona configurando un gradiente de temperatura. Las opciones para modelar la temperatura del aire de *DesignBuilder* son: aire mezclado, gradiente dinámico, ventilación de desplazamiento de 3 nodos, distribución de aire exterior por debajo del piso, distribución de aire interior por debajo del piso.  
Por defecto *DesignBuilder* coloca la temperatura del aire completamente uniforme con la opción de aire mezclado, esta opción es la más simple y reduce el tiempo de simulación, para el modelo de la biblioteca central se usa la configuración de aire mezclado.
- **Pestaña de resultados o salidas del programa:** En esta pestaña se deben seleccionar las variables que se van a calcular en la simulación. Para la biblioteca central se seleccionaron las siguientes variables: ganancias internas de calor incluyendo radiación solar, flujo de aire de entrada por las aperturas, flujo de salida de aire por las aperturas, temperatura sobre las superficies internas, temperatura sobre las superficies externas, CO<sub>2</sub>, confort térmico (humedad relativa, temperatura



del aire interior, temperatura radiante, temperatura operativa, horas de discomfort, temperatura de bulbo seco exterior).

- **Pestaña CFD:** *DesignBuilder* contiene un módulo de CFD que permite realizar análisis detallados del comportamiento del aire, transferencia de calor, edad del aire (tiempo promedio desde que las moléculas del aire ingresaron a la edificación), efectividad del cambio de aire (edad del aire si el aire la zona estuviera mezclado dividido para la edad promedio del aire que respiran los ocupantes de la zona).

### Método de simulación de *DesignBuilder*

El programa utiliza el software *EnergyPlus* como motor de simulación. *EnergyPlus* es una herramienta gratuita la cual se utiliza para el diseño y simulación energética de edificios y está programado en el lenguaje de programación *FORTTRAN*.

- **Jerarquía de datos**

El software *DesignBuilder* maneja una jerarquía para el modelo de datos en los diferentes edificios, bloques y zonas (lugares dentro del edificio). El programa tiene una jerarquía que va desde un nivel superior hacia un nivel inferior; el orden de esa jerarquía: sitio, edificio, bloque, zona, superficie, apertura.

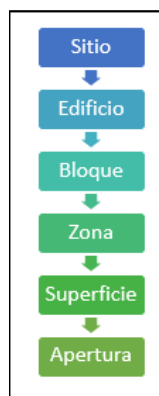


Figura VIII. 3. Jerarquía de datos.  
(Fuente: Autores)

El nivel superior de todo el edificio es el nivel de sitio, en este se colocan los datos de localización y región, estos datos se heredan hacia todos los lugares; si se modifica alguna plantilla en un nivel superior esta se hereda a los niveles inferiores, sin embargo, si en un nivel inferior se modifica una plantilla esta se utiliza solamente en el nivel que se modificó.

## Ejecución de un nuevo proyecto

Para crear un nuevo proyecto en *DesignBuilder* se debe ingresar una plantilla nueva donde se coloca el tipo de análisis energético, la ubicación del lugar y de manera opcional la casilla *LEED* con referencia en la norma *ASHRAE 90.1*. Apéndice G (edificios ecológicos con un buen nivel de IAQ). En el modelo se requiere ingresar los datos del sitio o de localización.

- **Datos de Localización**

Estos datos se deben introducir en la pestaña de sitio, los datos que se deben ingresar son los siguientes: plantilla de localización, ubicación del sitio, altura sobre el nivel del mar, exposición al viento, orientación del sitio, precipitaciones, aire Exterior, CO<sub>2</sub> y contaminantes, horario y horario de verano y datos meteorológicos de simulación.

- **Archivo meteorológico**

Para simular el edificio para las condiciones de la toma de datos en los días 13,14,17,18 y 19 de febrero del 2020 se debe crear un archivo que debe contener las variables meteorológicas del lugar (temperatura, humedad relativa, radiación solar directa normal, radiación solar difusa horizontal, radiación solar global horizontal, velocidad del viento y dirección del viento). El software *EnergyPlus* contiene las variables meteorológicas para diferentes lugares alrededor del mundo, en Quito el lugar que ofrece el programa es una estación en el Aeropuerto de Tababela, sin embargo, las condiciones del lugar son diferentes a las de la EPN, por lo tanto, se debe crear un archivo meteorológico con los datos de una estación meteorológica cercana a la EPN.

Para crear el nuevo archivo meteorológico de *EnergyPlus* se usaron los datos meteorológicos del año 2020 de la estación de SCINERGY (*Research in Alternative Energy*) la cual se ubica en la EPN.

Para crear el archivo meteorológico se puede modificar el archivo que *DesignBuilder* descarga del servidor de *EnergyPlus*, para esto se debe buscar el archivo meteorológico de extensión *EnergyPlus weather (epw)* en la carpeta *Weather Data* que se encuentra ubicada en el directorio de carpetas de *DesignBuilder*. Este archivo se debe convertir a un archivo de valores separados por comas (*csv*) con el programa conversor de *Aurea Consulting* de la página de *DesignBuilder* España [27]. Al momento de seleccionar un archivo se genera un script en la interfaz del convertidor con el encabezado del fichero,

este contiene información adicional del archivo, en la primera línea del archivo se puede modificar la latitud, longitud y altura del lugar.

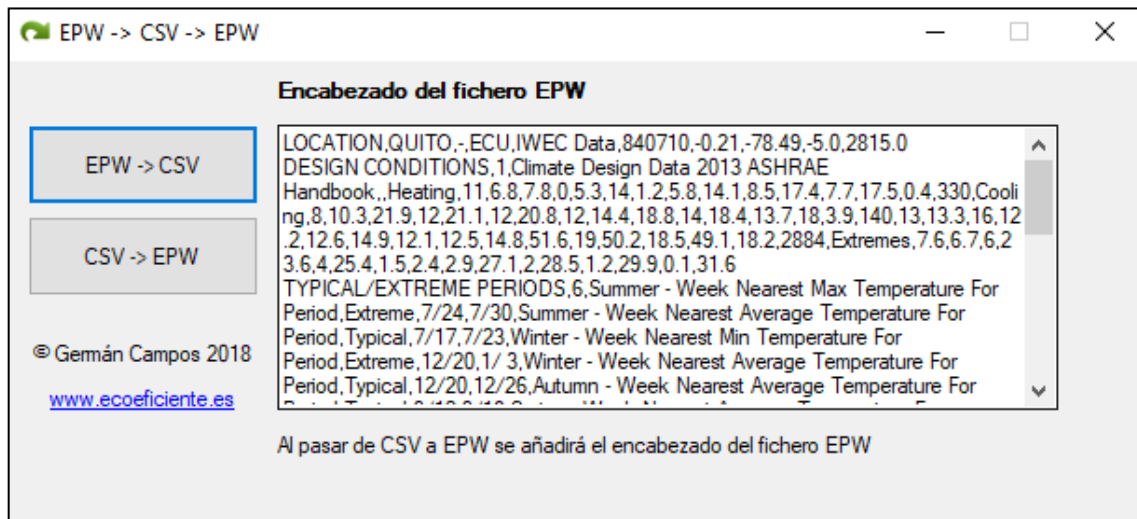


Figura VIII. 4. Conversor de Aurea Consulting Design Builder España.  
(Fuente: Autores)

En el archivo con extensión *csv* se deben reemplazar los valores horarios de las diferentes variables meteorológicas disponibles en los espacios correspondientes; los datos que se deben reemplazar son: temperatura, humedad relativa, radiación solar directa normal, radiación solar difusa horizontal, radiación solar global horizontal, velocidad del viento y dirección del viento. En el archivo meteorológico de *EnergyPlus* hay otras variables sin embargo solo se reemplazan los datos que se tengan disponibles; una vez colocados estos valores se debe guardar el archivo y convertirlo a extensión *epw* con el conversor de *Aurea Consulting*.

Después de crear el archivo con extensión *epw*, se debe utilizar la herramienta de *EnergyPlus Weather Statistics and Conversions* para generar cuatro archivos que utiliza *DesignBuilder*. Se debe seleccionar el archivo con extensión *epw* y generar un nuevo archivo con la misma extensión, el programa genera los cuatro archivos necesarios y los guarda en la carpeta *Weather Data* que se encuentra en el directorio de carpetas de *DesignBuilder*.

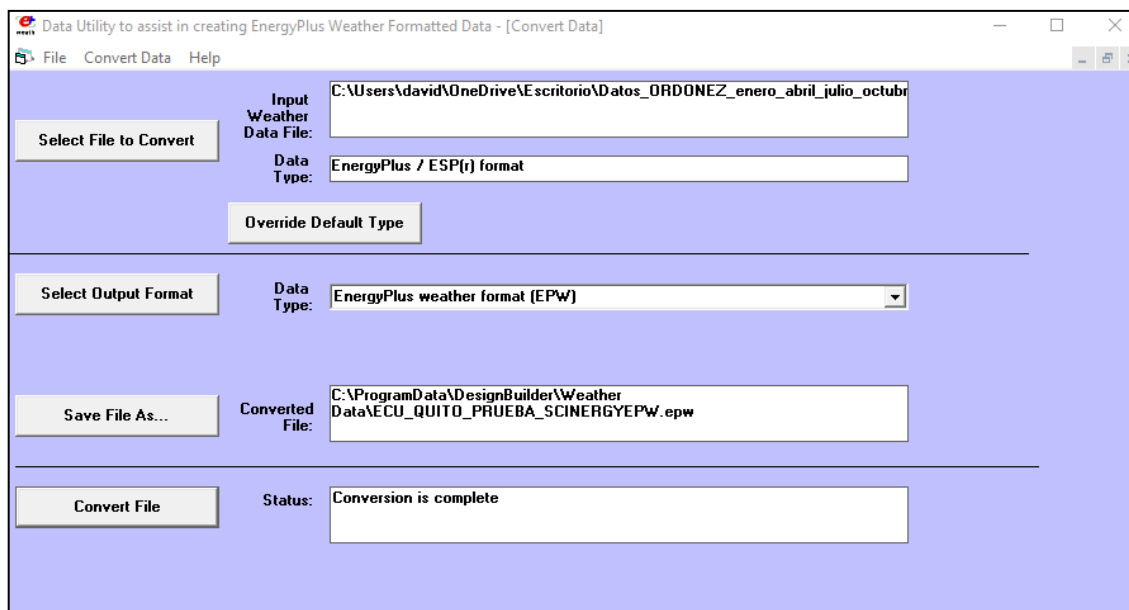


Figura VIII. 5. Herramienta Weather Statistics and Conversions.  
(Fuente: Autores)

- **Datos de región**

Los datos de la región legislativa son datos de una región, provincia o país que tienen sus propias leyes con respecto a códigos de energía local, regulación de la construcción, factores de emisión de dióxido de carbono para algunos combustibles y niveles de aislamiento para el prediseño de edificios.

El software *DesignBuilder* coloca por defecto la región del lugar y la regulación de la construcción. Para Ecuador el programa no contiene una plantilla para los datos de la región legislativa.

- **Opciones del modelo**

Se debe editar la configuración general que utilizará el programa para el manejo de datos y opciones avanzadas que permiten modificar opciones específicas de las cuales depende el tiempo de simulación, configuración de la simulación, herramientas de dibujo, detalles del proyecto y detalles del carbono en el edificio.

- **Pestaña de datos**

En esta pestaña se debe configurar las opciones para el formato de manejo de datos de *DesignBuilder*. La pestaña contiene las siguientes opciones. En la tabla siguiente se muestra un resumen de las posibles entradas que el software permite, en esta se selecciona el método de simulación elegido para la biblioteca central con una x.

Tabla VIII. 1. Opciones del modelo.

<b>Opciones del modelo</b>		
<b>Pestaña datos</b>		
Construcción y datos de acristalamiento	Prediseño	
	Diseño	x
Datos de ganancias	Agrupado	
	Simplificadas	x
	Detallado	
Definición de ganancias por ocupación	Densidad de ocupación	
	Área por persona	
	Número de ocupantes	x
Ganancias latentes por ocupación	Cálculo dinámico	x
	Fracción fija	
Ganancias por equipos	Densidad de potencia	x
	Potencia absoluta por zona	
Ganancias por luminarias	Densidad de potencia	x
	Potencia absoluta por zona	
Sincronización	Día típico de trabajo	
	Programación	x
HVAC	Sistemas de ventilación y aire acondicionado	Modo pasivo (desactivado)
Ventilación natural e infiltraciones	Horaria	
	Calculada	x

(Fuente: Autores)

- **Pestaña de datos avanzados y simulados**

En esta pestaña de datos avanzados se deben configurar opciones de simplificación y opciones específicas de *DesignBuilder*. La pestaña de datos simulados permite especificar los datos detallados de ganancias solares, visualizar los resultados en gráficos y visualizar los datos en tablas. En la siguiente tabla se especifica las opciones de pestaña y se muestra con x las opciones activadas.

Tabla VIII. 2. Opciones del modelo.

<b>Opciones del modelo</b>			
<b>Pestaña datos avanzados</b>		<b>Pestaña de datos simulación</b>	
<b>Simplificación</b>		<b>Opciones de simulación</b>	
Agrupar zonas con la misma actividad		Desde	13-feb
agrupar zonas conectadas por huecos		Hasta	19-feb
Agrupar zonas por selección	x	<b>Opciones de cálculo</b>	
Agrupar ventanas similares en una superficie		Etapas de simulación	12
agrupar grietas similares en una superficie		Tipo de temperatura para consignas	Temperatura del aire
<b>Ventilación natural</b>		<b>Soleamiento</b>	
Modelar flujo de aire a través de huecos y particiones	x	Incluir todos los edificios en el cálculo de sombras	x
Calculada	x	Incluir sombreado de las zonas excluidas en las simulaciones	x
coeficiente de descarga	x	Modelar las reflexiones exteriores	x
Caudal de aire a través de aberturas internas	x	Distribución solar	Completa exterior
<b>Iluminación</b>		<b>Resultados</b>	
Método de iluminación natural	Detallado	Permitir resultados personalizados	x

(Fuente: Autores)

## ANEXO IX. Confort térmico en las aulas M201, M101 y M110

### Aula M201

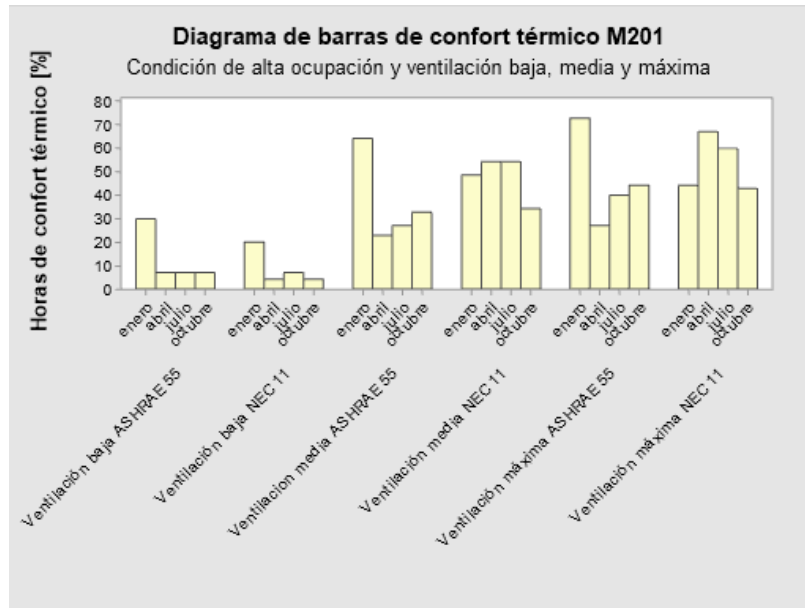


Figura IX. 1. Diagrama de barras de horas de confort térmico en M201 en condiciones de alta ocupación y ventilación baja, media y máxima.  
(Fuente: Autores)

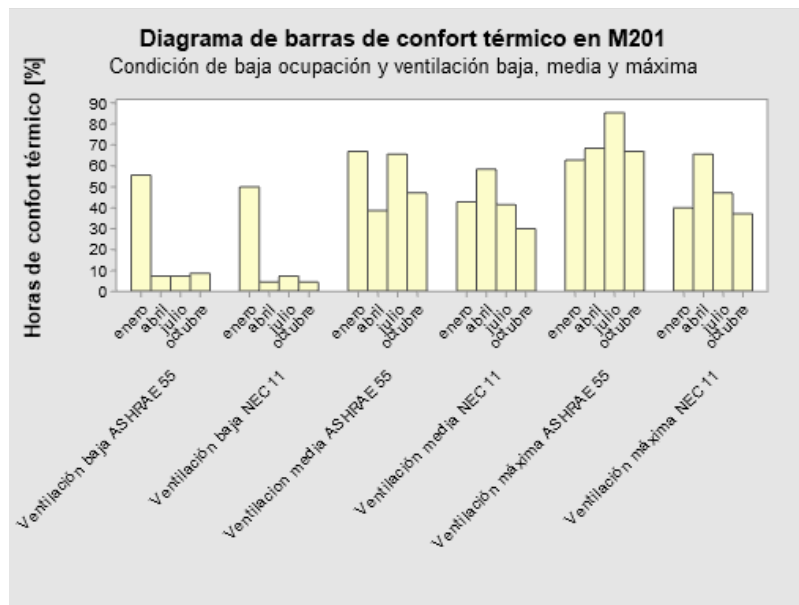
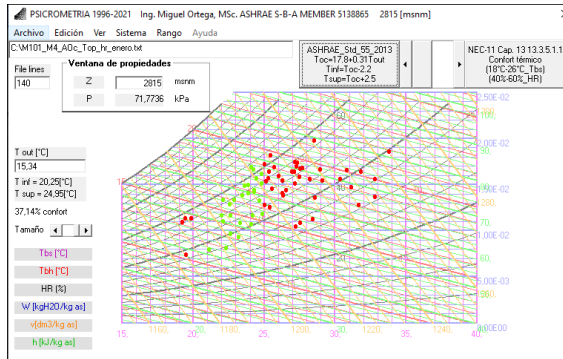


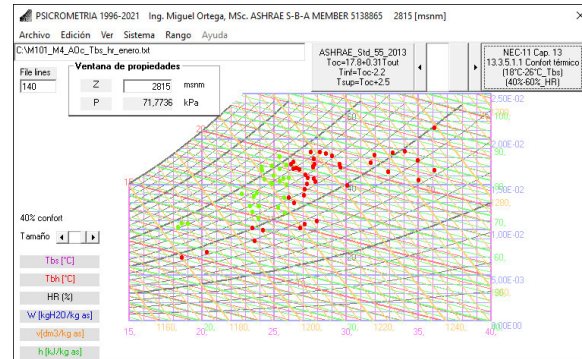
Figura IX. 2. Diagrama de barras de horas de confort térmico en M201 en condiciones de baja ocupación y ventilación baja, media y máxima.  
(Fuente: Autores)

## Aula M101

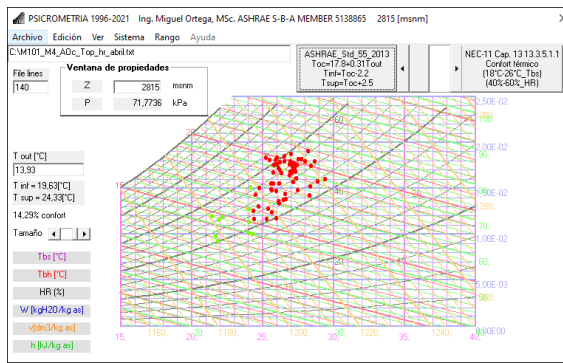
La figura IX.3. corresponde a los resultados obtenidos para el aula M101 en alta ocupación con ventilación natural baja (ventanas y puertas cerradas, M4) en el que se aprecia un compendio de cartas psicrométricas en los 4 meses de análisis tanto para el modelo adaptativo y modelo referencial NEC 11. En las tablas IX.1. y IX.2. se muestra un resumen del aula M101 en condición de alta y baja ocupación.



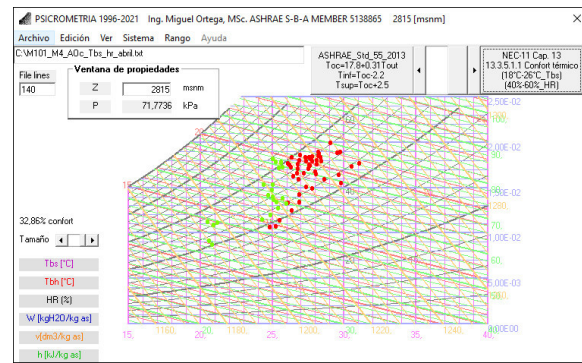
(a)



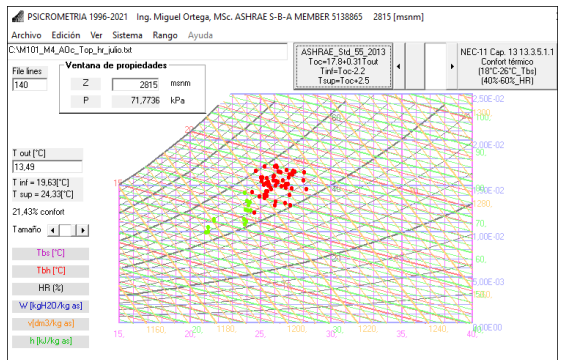
(b)



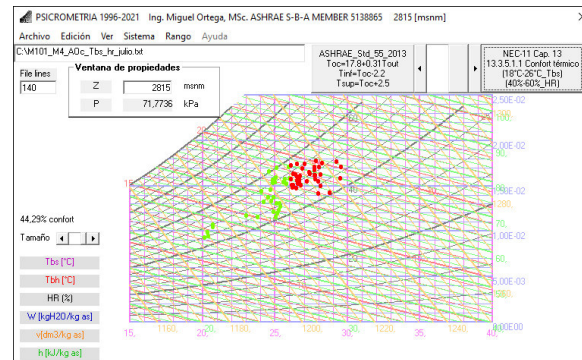
(c)



(d)



(e)



(f)



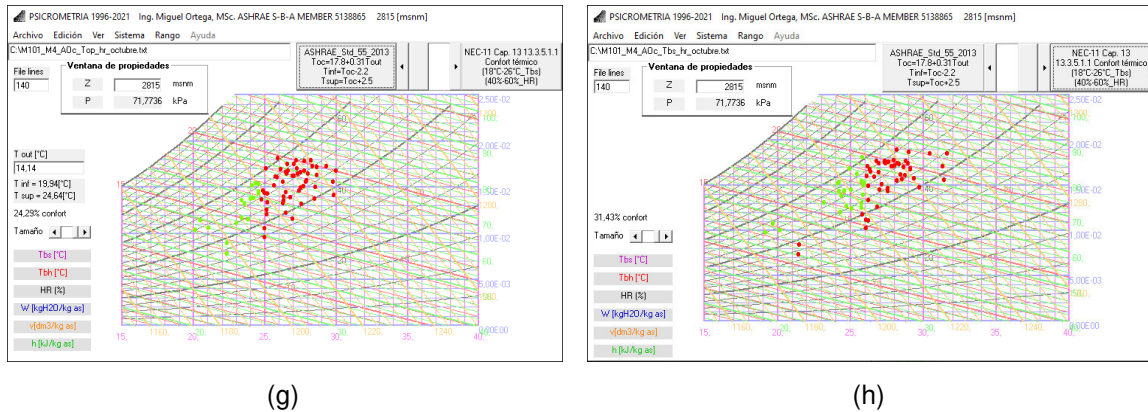


Figura IX. 3. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de ASHRAE (izquierda) y modelo recomendado por NEC 11 (derecha), aula M101 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).  
(Fuente: Autores)

Tabla IX. 1. Porcentaje de horas de confort térmico en el aula M101 en alta ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).

M101 Alta Ocupación	Ventilación Baja (M4)		Ventilación media (M2)		Ventilación máxima (M1)	
	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]
	ASHRAE 55 ( $t_{top}$ )	NEC 11 ( $t_{air}$ )	ASHRAE 55 ( $t_{top}$ )	NEC 11 ( $t_{air}$ )	ASHRAE 55 ( $t_{top}$ )	NEC 11 ( $t_{air}$ )
Enero	37,14	40	70	42,86	67,14	41,43
Abril	14,29	32,86	92,86	77,14	91,43	77,14
Julio	21,43	44,29	97,14	80	94,29	75,71
Octubre	24,29	31,43	80	62,86	74,29	62,86

(Fuente: Autores)

Tabla IX. 2. Porcentaje de horas de confort térmico en el aula M101 en baja ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).

M101 Baja Ocupación	Ventilación Baja (M4)		Ventilación media (M2)		Ventilación máxima (M1)	
	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]
	ASHRAE 55 ( $t_{top}$ )	NEC 11 ( $t_{air}$ )	ASHRAE 55 ( $t_{top}$ )	NEC 11 ( $t_{air}$ )	ASHRAE 55 ( $t_{top}$ )	NEC 11 ( $t_{air}$ )
Enero	45,71	44,29	54,29	41,43	52,86	38,57
Abril	82,86	71,43	92,86	78,57	87,14	80
Julio	94,29	78,57	92,86	82,86	84,29	81,43
Octubre	70	58,57	88,57	60	82,86	62,86

(Fuente: Autores)

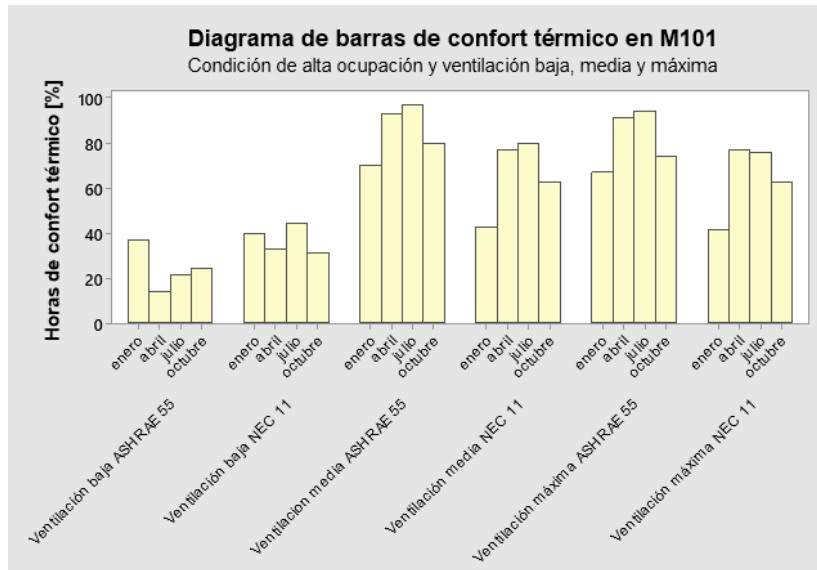


Figura IX. 4. Diagrama de barras de horas de confort térmico en M101 en condiciones de alta ocupación y ventilación baja, media y máxima.  
(Fuente: Autores)

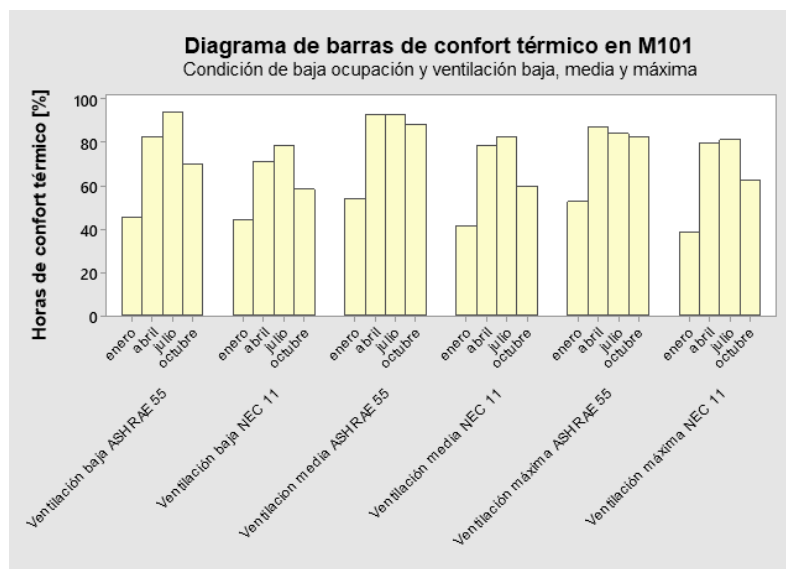


Figura IX. 5. Diagrama de barras de horas de confort térmico en M101 en condiciones de baja ocupación y ventilación baja, media y máxima.  
(Fuente: Autores)

## Aula M110

La figura IX.6. corresponde a los resultados obtenidos para el aula M110 que posee 24 computadoras prendidas durante las horas de clase (7am a 6pm) en la condición de alta ocupación con ventilación natural baja (ventanas y puertas cerradas, M4). En las tablas IX.3. y IX.4. se muestra un resumen del aula M110 en condición de alta y baja ocupación.

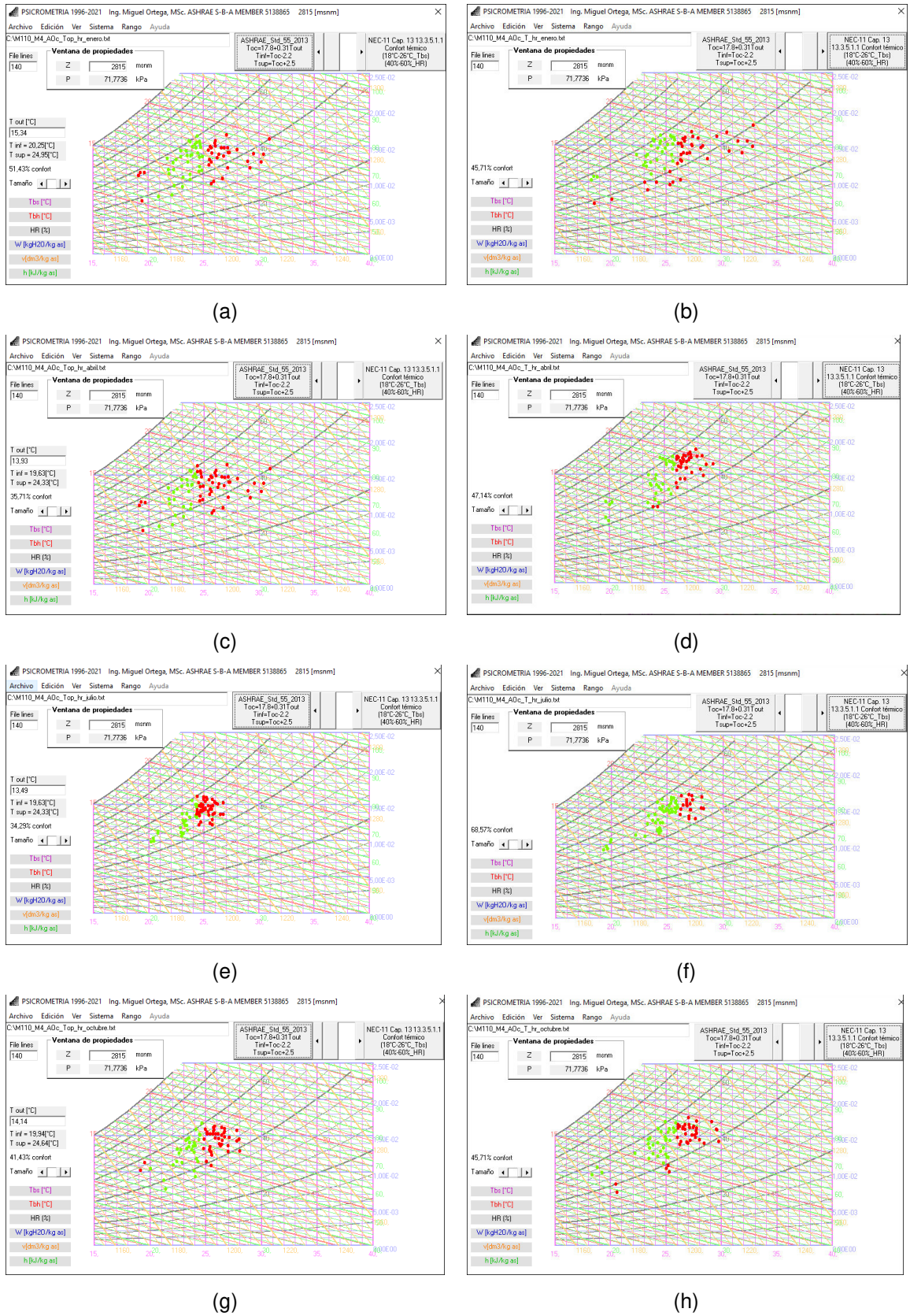


Figura IX. 6. Cartas psicrométricas de la ciudad de Quito y análisis de confort térmico para modelo adaptativo de *ASHRAE* (izquierda) y modelo recomendado por *NEC 11* (derecha), aula M110 en los meses de enero (a) (b), abril (c) (d), julio (e) (f), octubre (g) (h).

(Fuente: Autores)

Tabla IX. 3. Porcentaje de horas de confort térmico en el aula M110 en alta ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).

M110 Alta Ocupación	Ventilación Baja (M4)		Ventilación media (M2)		Ventilación máxima (M1)	
	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]
	ASHRAE 55 (t <sub>op</sub> )	NEC 11 (t <sub>air</sub> )	ASHRAE 55 (t <sub>op</sub> )	NEC 11 (t <sub>air</sub> )	ASHRAE 55 (t <sub>op</sub> )	NEC 11 (t <sub>air</sub> )
Enero	51,43	45,71	74,29	48,57	80	44,29
Abril	35,71	47,14	91,43	82,86	95,71	80
Julio	34,29	68,57	95,71	84,29	95,71	85,71
Octubre	41,43	45,71	82,86	64,29	92,88	62,86

(Fuente: Autores)

Tabla IX. 4. Porcentaje de horas de confort térmico en el aula M110 en baja ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).

M110 Baja Ocupación	Ventilación Baja (M4)		Ventilación media (M2)		Ventilación máxima (M1)	
	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]
	ASHRAE 55 (t <sub>op</sub> )	NEC 11 (t <sub>air</sub> )	ASHRAE 55 (t <sub>op</sub> )	NEC 11 (t <sub>air</sub> )	ASHRAE 55 (t <sub>op</sub> )	NEC 11 (t <sub>air</sub> )
Enero	62,86	45,71	65,71	42,86	61,43	38,57
Abril	90	81,43	92,86	85,71	82,86	81,43
Julio	92,86	90	92,86	90	82,86	85,71
Octubre	81,43	60	84,29	58,57	72,86	60

(Fuente: Autores)

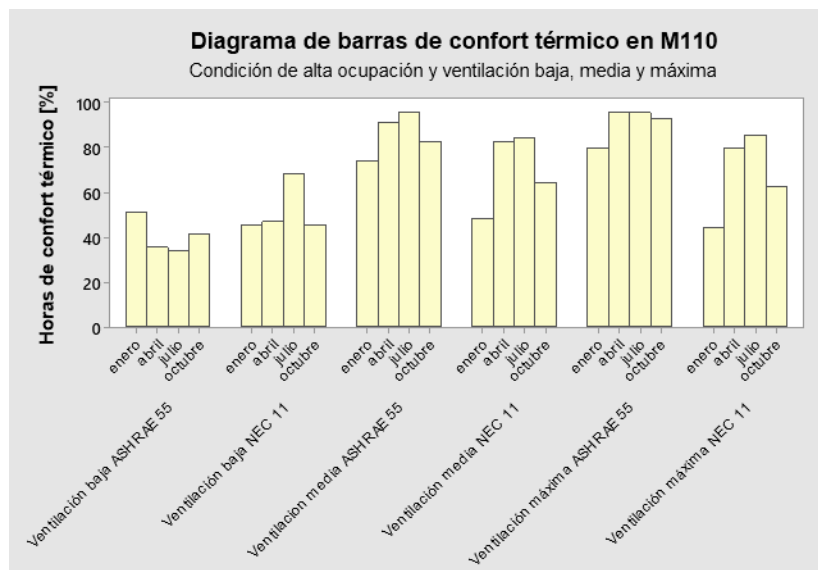


Figura IX. 7. Diagrama de barras de horas de confort térmico en M110 en condiciones de alta ocupación y ventilación baja, media y máxima.

(Fuente: Autores)

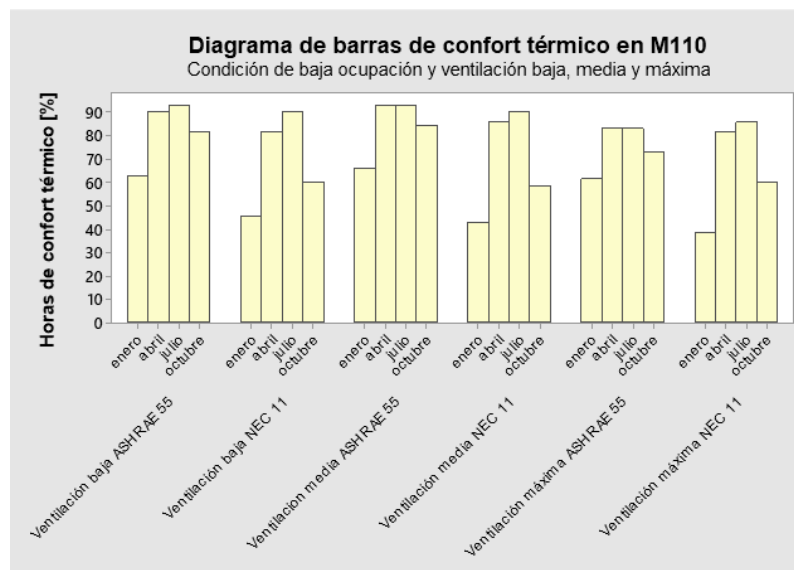


Figura IX. 8. Diagrama de barras de horas de confort térmico en M110 en condiciones de baja ocupación y ventilación baja, media y máxima.  
(Fuente: Autores)

Tabla IX. 5. Diferencia entre escenarios de ventilación M2 y M4 de las aulas M201, M101 y M110 en alta ocupación.

Meses simulados	Diferencia entre la ventilación media (M2) y ventilación máxima (M4)					
	Aula M201		Aula M101		Aula M110	
	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]	Horas de confort [%]
	ASHRAE 55 ( $t_{op}$ )	NEC 11 ( $t_{air}$ )	ASHRAE 55 ( $t_{op}$ )	NEC 11 ( $t_{air}$ )	ASHRAE 55 ( $t_{op}$ )	NEC 11 ( $t_{air}$ )
Enero	4,28	12,85	2,86	1,43	5,71	4,28
Abril	12,86	5,71	1,43	0	4,28	2,86
Julio	11,43	8,57	2,85	4,29	0	1,42
Octubre	9,29	5,71	5,71	0	10,02	1,43
Promedio	9,46	8,21	3,21	1,43	5,00	2,50

(Fuente: Autores)

## ANEXO X. IAQ en las aulas M201, M101 y M110

### Aula M201

#### Alta ocupación

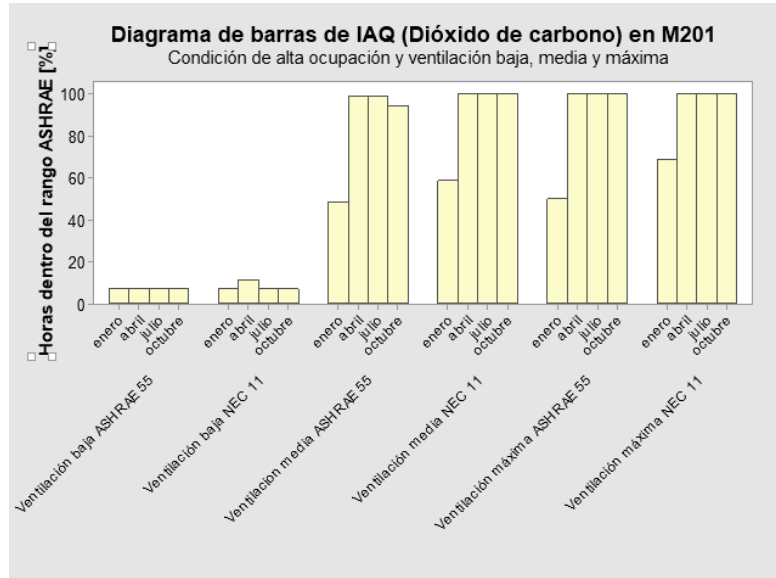


Figura X.1. Diagrama de barras del porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> que se encuentran dentro del rango recomendado por *ASHRAE Handbook* y NTP 549 en M201 en condiciones de alta ocupación y ventilación baja, media y máxima.

(Fuente: Autores)

#### Baja ocupación

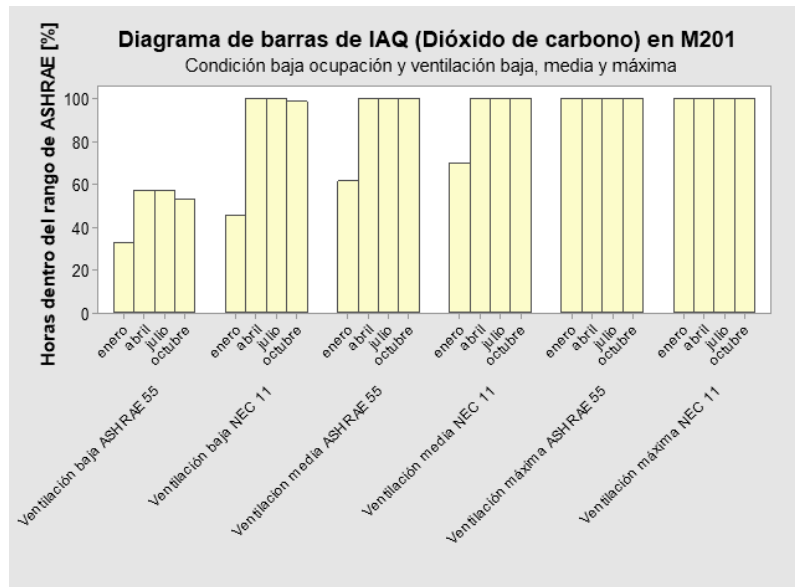
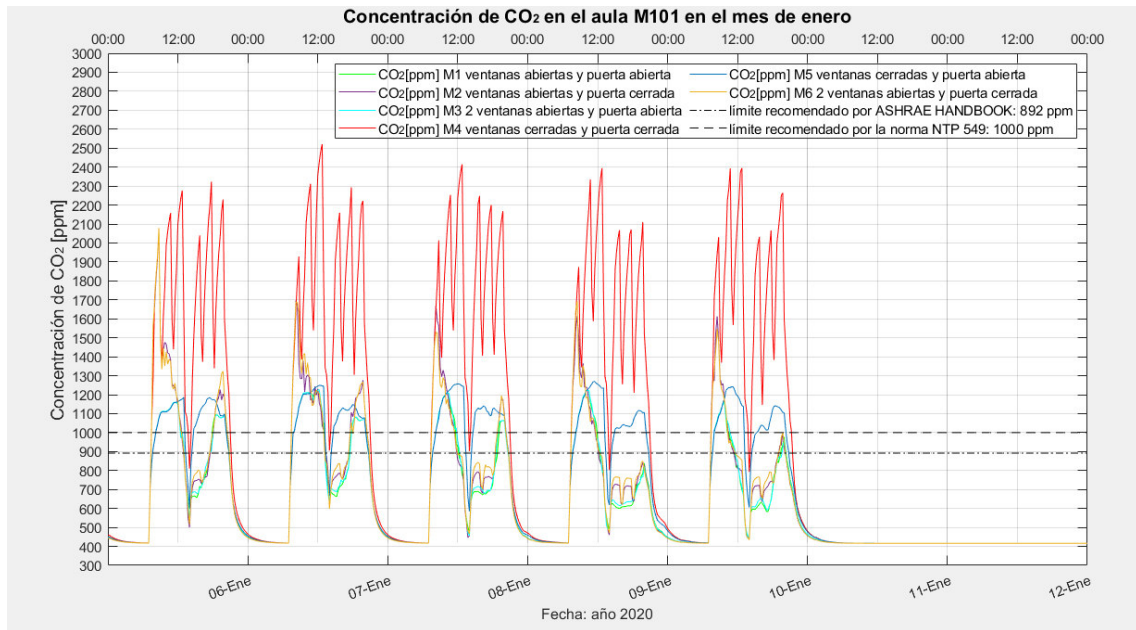


Figura X.2. Diagrama de barras del porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> que se encuentran dentro del rango recomendado por *ASHRAE Handbook* y NTP 549 en M201 en condiciones de baja ocupación y ventilación baja, media y máxima.

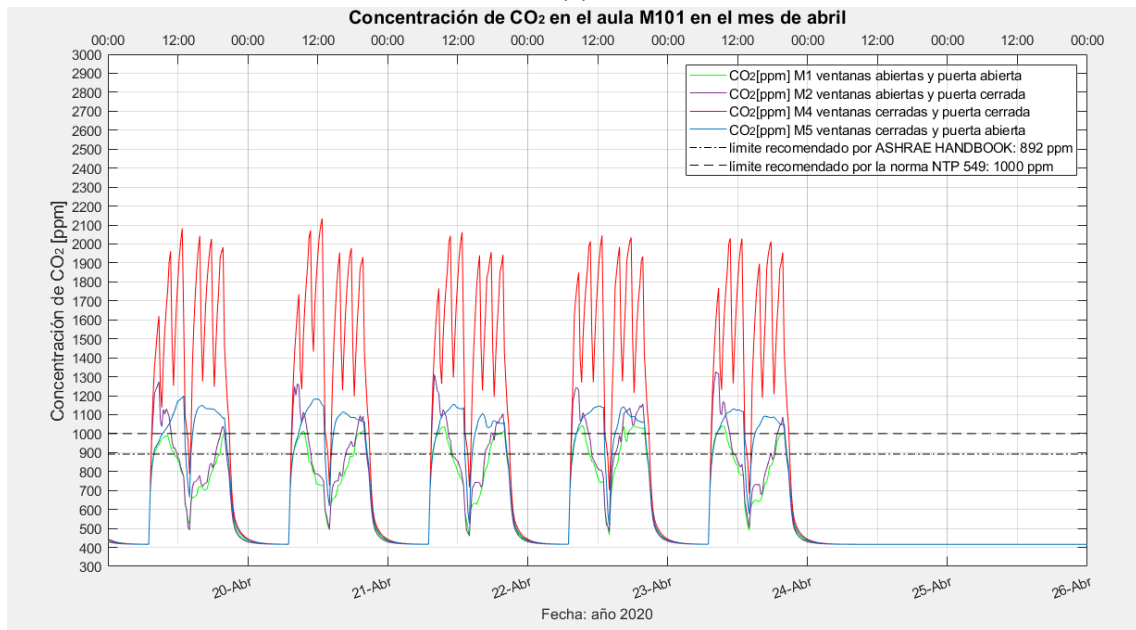
(Fuente: Autores)

# Aula M101

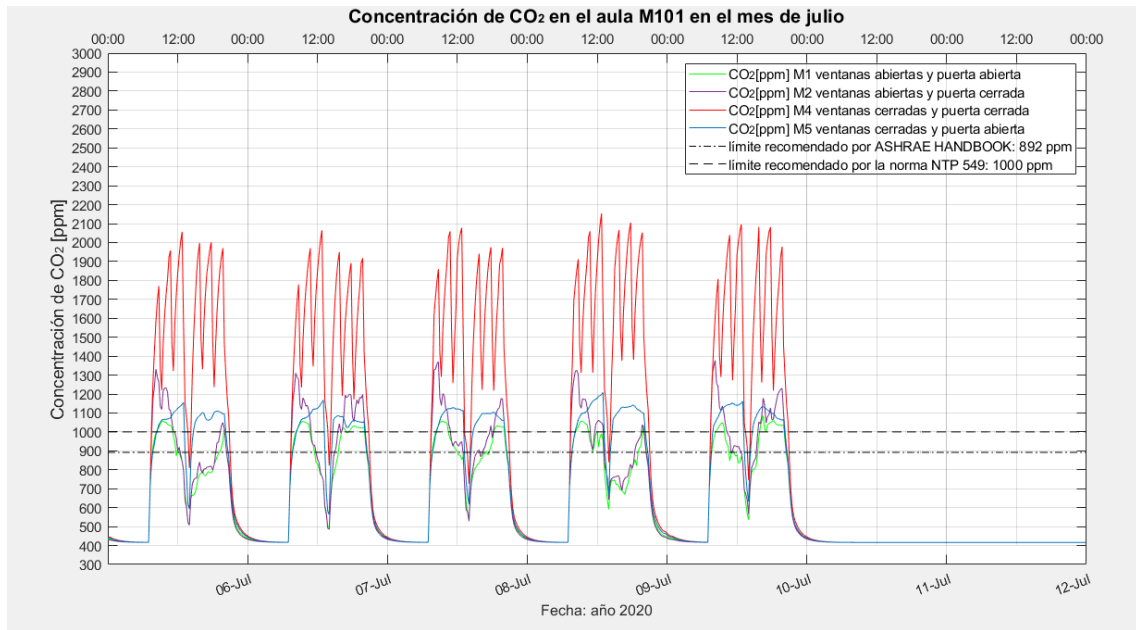
## Alta ocupación



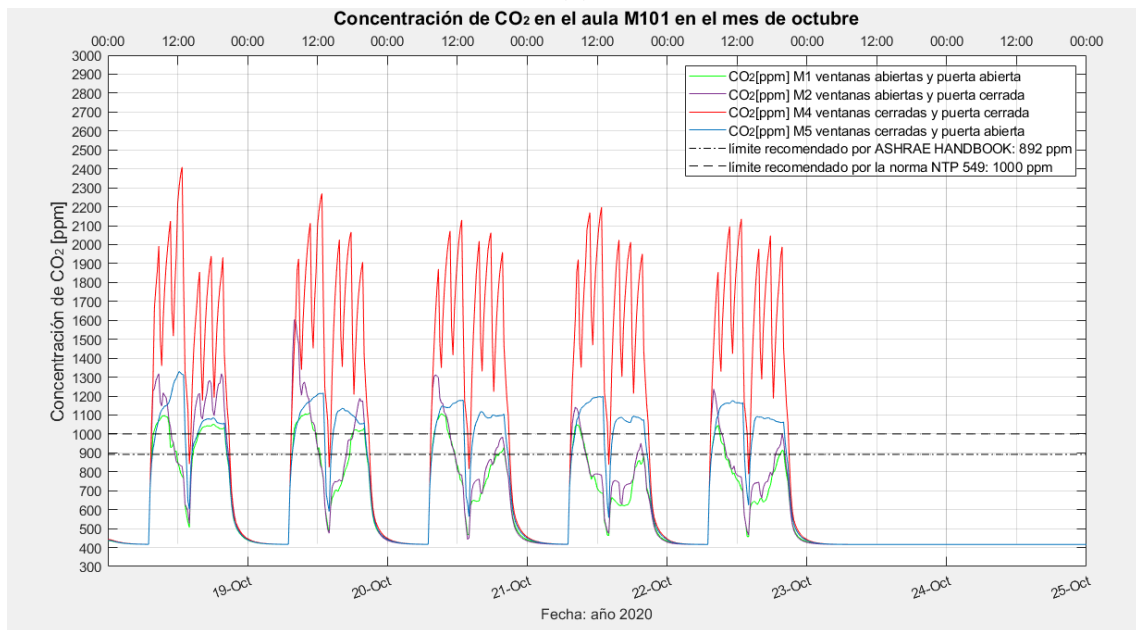
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura X.3. Concentración de CO<sub>2</sub> en los diferentes meses de enero (a), febrero (b), julio (c) y octubre (d) del año 2020 en el aula M101 para alta ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4, M5).  
(Fuente: Autores)



Tabla X.1. Porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> que se encuentran dentro del rango recomendado por *ASHRAE Handbook* y NTP 549 en el aula M101 en alta ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).

M101 Alta Ocupación	Ventilación Baja (M4)		Ventilación media (M2)		Ventilación máxima (M1)	
	Horas CO <sub>2</sub> dentro del rango [%]	Horas CO <sub>2</sub> dentro del rango [%]	Horas CO <sub>2</sub> dentro del rango [%]	Horas CO <sub>2</sub> dentro del rango [%]	Horas CO <sub>2</sub> dentro del rango [%]	Horas CO <sub>2</sub> dentro del rango [%]
	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )
Enero	7,14	8,57	50	57,14	57,14	65,71
Abril	7,14	12,86	47,14	62,86	65,71	92,86
Julio	7,14	11,43	37,14	54,29	54,29	74,29
Octubre	7,14	10	54,29	68,57	67,14	80

(Fuente: Autores)

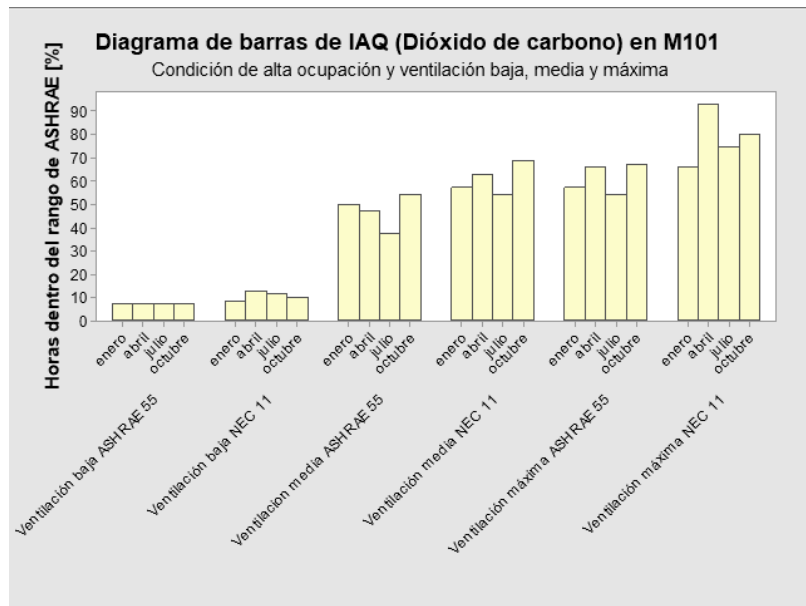


Figura X.4. Diagrama de barras del porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> que se encuentran dentro del rango recomendado por *ASHRAE Handbook* y NTP 549 en M101 en condiciones de alta ocupación y ventilación baja, media y máxima.

(Fuente: Autores)

## Baja ocupación

Tabla X.2. Porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> que se encuentran dentro del rango recomendado por *ASHRAE Handbook* y NTP 549 en el aula M101 en baja ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).

M101 Baja Ocupación	Ventilación Baja (M4)		Ventilación media (M2)		Ventilación máxima (M1)	
	Horas CO <sub>2</sub> dentro del rango [%]	Horas CO <sub>2</sub> dentro del rango [%]	Horas CO <sub>2</sub> dentro del rango [%]	Horas CO <sub>2</sub> dentro del rango [%]	Horas CO <sub>2</sub> dentro del rango [%]	Horas CO <sub>2</sub> dentro del rango [%]
	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )
Enero	48,57	92,86	71,43	94,29	100	100
Abril	97,14	100	100	100	100	100
Julio	95,71	100	95,71	100	100	100
Octubre	90	100	92,86	100	100	100

(Fuente: Autores)

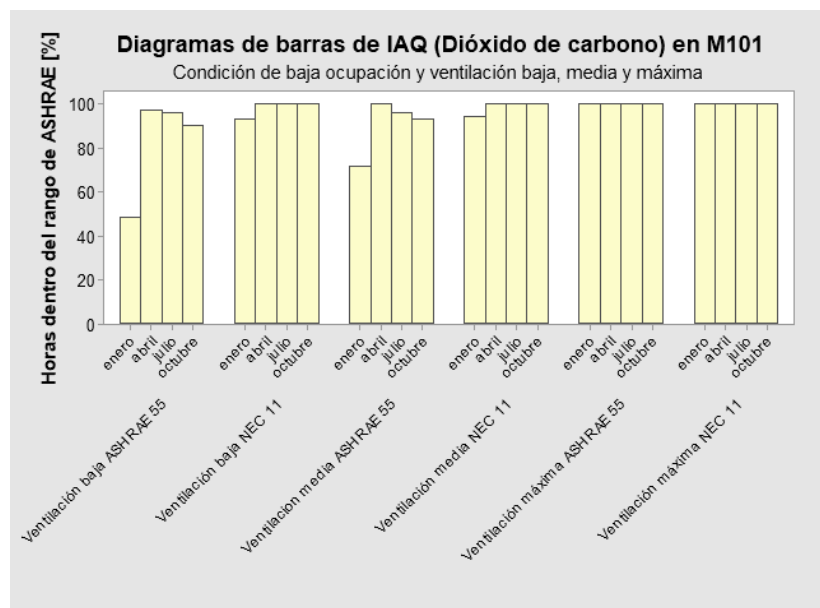
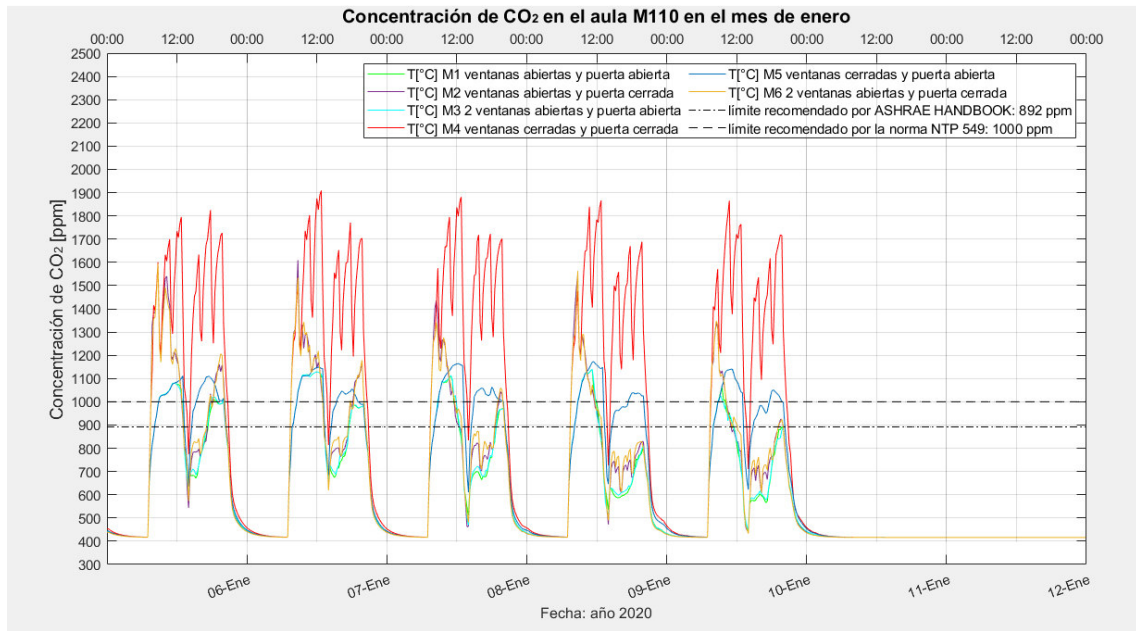


Figura X.5. Diagrama de barras del porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> que se encuentran dentro del rango recomendado por *ASHRAE Handbook* y NTP 549 en M101 en condiciones de baja ocupación y ventilación baja, media y máxima.

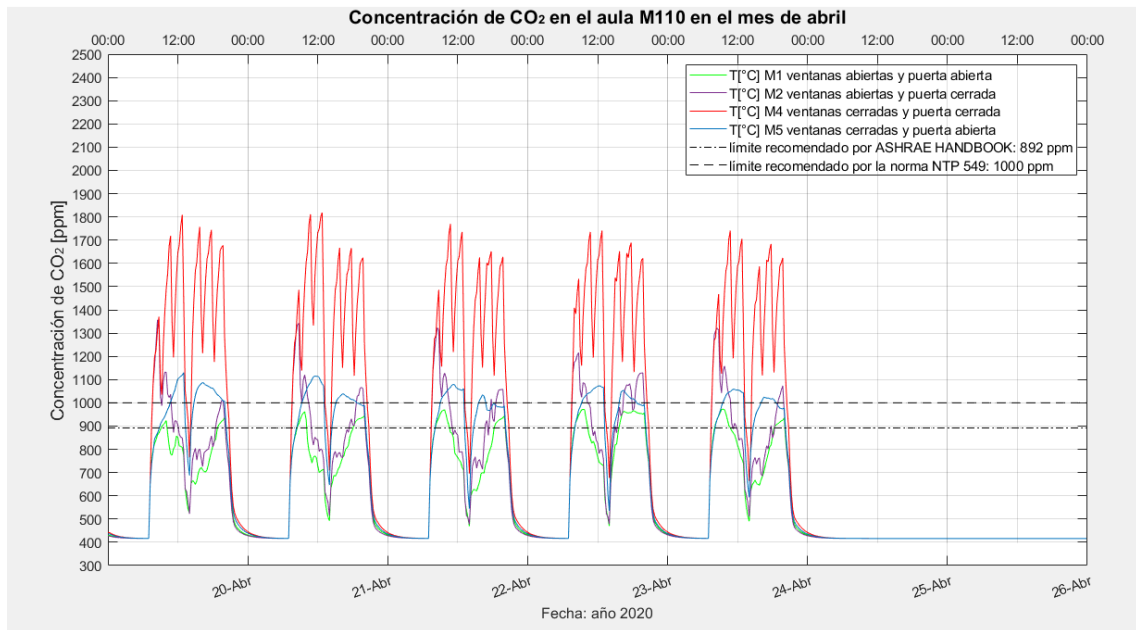
(Fuente: Autores)

# Aula M110

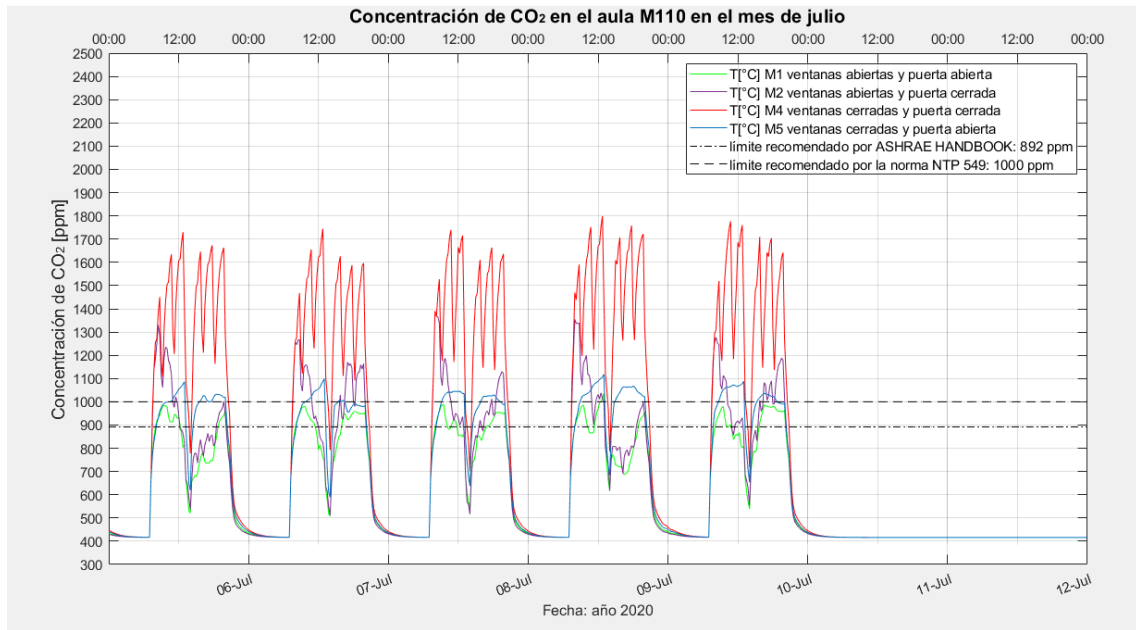
## Alta ocupación



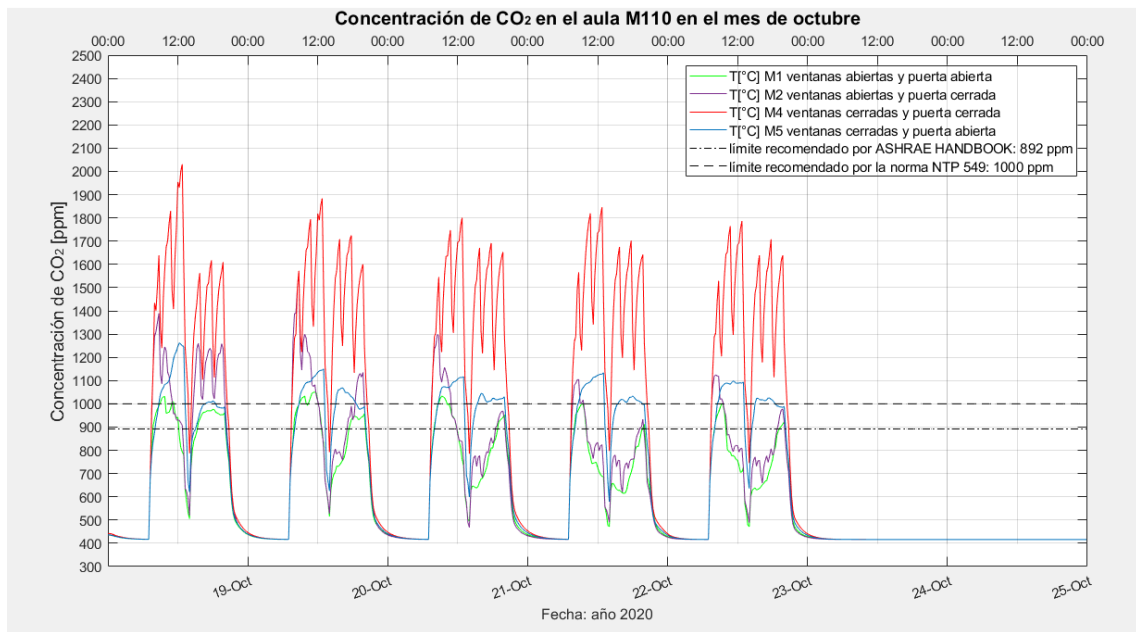
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura X.6. Concentración de CO<sub>2</sub> en los diferentes meses de enero (a), febrero (b), julio (c) y octubre (d) del año 2020 en el aula M110 para alta ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4, M5).  
(Fuente: Autores)

Tabla X.3. Porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> que se encuentran dentro del rango recomendado por *ASHRAE Handbook* y NTP 549 en el aula M110 en alta ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).

M110 Alta Ocupación	Ventilación Baja (M4)		Ventilación media (M2)		Ventilación máxima (M1)	
	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]
	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )
Enero	10	14,29	50	61,43	58,57	82,86
Abril	12,86	14,29	44,29	70	71,43	100
Julio	8,57	14,29	34,29	55,71	57,14	98,57
Octubre	7,14	14,29	51,43	68,57	62,86	97,14

(Fuente: Autores)

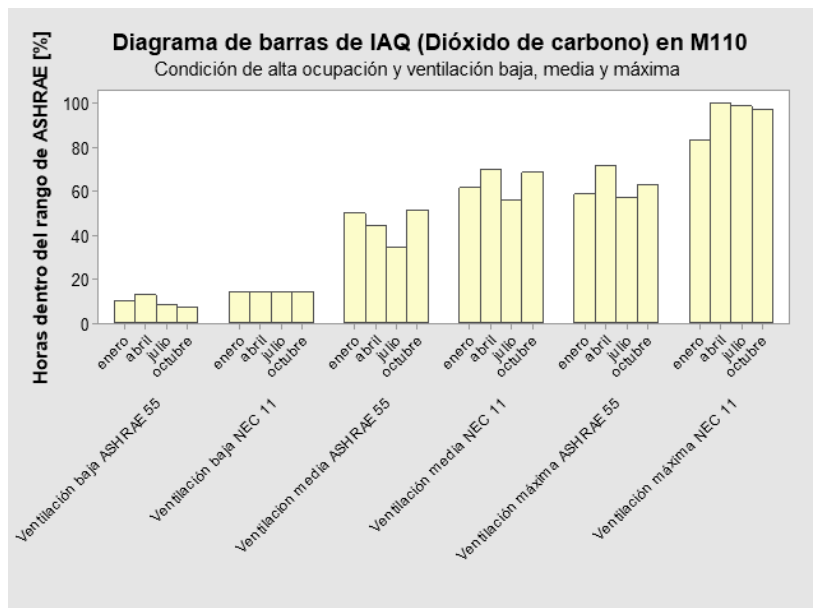


Figura X.7. Diagrama de barras del porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> que se encuentran dentro del rango recomendado por *ASHRAE Handbook* y NTP 549 en M110 en condiciones de alta ocupación y ventilación baja, media y máxima.

(Fuente: Autores)

## Baja ocupación

Tabla X.4. Porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> que se encuentran dentro del rango recomendado por *ASHRAE Handbook* y NTP 549 en el aula M110 en baja ocupación y diferentes escenarios de ventilación (M1, M2, M4).

M110 Baja Ocupación	Ventilación Baja (M4)		Ventilación media (M2)		Ventilación máxima (M1)	
	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]	Horas CO <sub>2</sub> bajo norma [%]
	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )	ASHRAE (CO <sub>2</sub> )	NTP 549 (CO <sub>2</sub> )
Enero	98,57	100	98,57	100	100	100
Abril	100	100	100	100	100	100
Julio	100	100	100	100	100	100
Octubre	97,14	100	97,14	100	100	100

(Fuente: Autores)

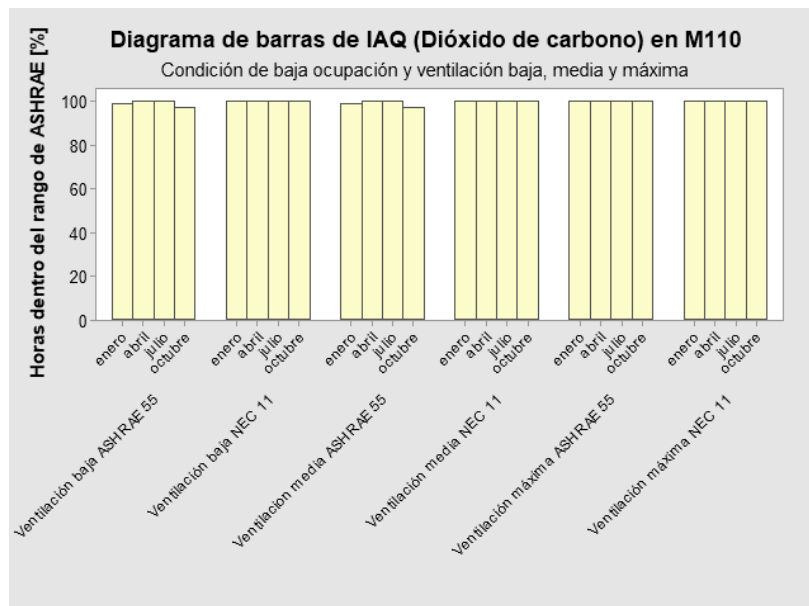


Figura X.8. Diagrama de barras del porcentaje de horas de CO<sub>2</sub> que se encuentran dentro del rango recomendado por *ASHRAE Handbook* y NTP 549 en M110 en condiciones de baja ocupación y ventilación baja, media y máxima.

(Fuente: Autores)